

DOI: 10.20189/j.cnki.CN/61-1527/E.202505007

# 激光导引头数字化建模与仿真

李 晓, 刘志国, 廖守亿, 郭 杨  
(火箭军工程大学, 西安 710025)

**摘 要:** 针对激光制导武器数字化转型的迫切需要, 基于计算建模与仿真分析方法, 构建了激光导引头全链路数字化仿真平台。首先, 通过建立激光导引头从激光传输、光电转换、自动增益放大、信号处理到定位解算的全流程全要素数学模型, 实现了导引头工作机理的数字表征; 其次, 针对四象限探测器的测角特性开展理论建模, 建立了输入信号与输出角度的数学映射关系, 通过数值仿真揭示了测角精度与入射角度的非线性关系; 最后, 开发了激光导引头数字化仿真平台, 支持输入信号参数、导引头光学参数、激光照射器参数以及高重频干扰参数的调整, 可实时输出四象限探测器输出、A/D 采样、信号处理、定位解算等过程的关键数据。经多场景仿真验证, 数字仿真平台输出结果与理论模型具有良好的一致性, 为激光制导武器的数字化设计提供了参考。

**关键词:** 激光导引头; 数字化; 高重频; 半主动

**中图分类号:** TN209

**文献标志码:** A

**开放科学标识码(OSID):**

**文章编号:** 2097-2741(2025)05-0075-09



听语音  
与作者互动  
聊科研

## Digital Modeling and Simulation of Laser Seekers

LI Xiao, LIU Zhiguo, LIAO Shouyi, GUO Yang  
(Rocket Force University of Engineering, Xi'an 710025, China)

**ABSTRACT:** In response to the urgent requirement for digital transformation of laser-guided weapons, a full-chain digital simulation platform for laser seekers was constructed based on computational modeling and simulation analysis techniques. First, the seeker's working mechanism was digitally characterized by developing an end-to-end mathematical model that captured all constituent process, including laser transmission, photoelectric conversion, automatic gain amplification, signal processing and positioning solution. Second, the theoretical modeling of the angle measurement characteristics of the four-quadrant detector was carried out, and the mathematical mapping relationship between the input signals and output angle was established. The nonlinear relationship between the angle measurement accuracy and incident angle was revealed through numerical simulation. Finally, a digital simulation platform for laser seekers was developed. It supported the adjustment of input signal parameters, seeker optical parameters, laser irradiation pa-

**收稿日期:** 2025-03-03

**修回日期:** 2025-05-13

**录用日期:** 2025-05-29

**基金项目:** 国家自然科学基金(61673017, 61673386)

**第一作者:** 李晓(2002—), 男, 硕士研究生, 主要从事导航、制导仿真研究。E-mail: 1493752108@qq.com

**引用格式:** 李晓, 刘志国, 廖守亿, 等. 激光导引头数字化建模与仿真[J]. 火箭军工程大学学报, 2025, 39(5): 75-83. LI Xiao, LIU Zhiguo, LIAO Shouyi, et al. Digital modeling and simulation of laser seekers[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2025, 39(5): 75-83.

rameters and high repetition rate interference parameters, and it output key real-time data, such as four-quadrant detection output, A/D sampling, signal processing results, and positioning solutions. After multi-scenario simulation verification, the platform's outputs demonstrate strong consistency with the theoretical model, providing an effective tool for the digital design of laser-guided weapons.

**KEYWORDS:** laser seeker; digitization; high repetition rate; semi-active

随着数字技术在各个领域的不断渗透与发展,为了适应新型战争形势的需要,武器装备正朝着标准化、模块化和数字化的方向转型发展,而中国数字化技术相较于美国数字化工程起步较晚。自 2018 年美国国防部发布《数字工程战略》以来,美国军方、美国空军寿命周期管理中心以及各大兵工企业等在武器装备系统数字化转型方面均已取得重大突破<sup>[1-6]</sup>。

激光制导武器自问世以来一直是各国军事研究的重点领域,也是数字化转型的重要对象<sup>[7]</sup>。就半主动激光导引头的数字化建模研究现状而言,主要集中在对四象限探测器特性的描述、角度计算、误差修正以及干扰分析。如杜亚雯等<sup>[8]</sup>设计了一种半主动激光导引头光学系统,并得到四象限探测器光敏面上光斑半径的取值区间;Yang 等<sup>[9]</sup>设计了一种四象限光电检测系统,可以精准计算激光光斑中心位移,精度可达 0.02 mm;仲启媛等<sup>[10]</sup>基于四象限探测器的光斑位置检测原理,建立了探测器检测位置与光斑实际位置的关系模型;唐彦琴等<sup>[11]</sup>提出一种基于高斯分布的光斑中心定位算法,其测量精度较传统方法提升约 43.8%;郝林结等<sup>[12]</sup>提出一种亚微米级别的椭圆四象限定位算法;Li 等<sup>[13]</sup>提出半主动激光终端校正弹药的地面目标定位算法,大大提升了 7 m 以内弹体的定位精度;张骏等<sup>[14]</sup>提出针对四象限探测器固有误差与非均匀性的标定与修正方法;邱雄等<sup>[15-16]</sup>系统分析了噪声对测角精度的影响,建立了测角与跟踪误差模型;Zhang 等<sup>[17]</sup>提出半主动激光寻的校准方法;张帅等<sup>[18]</sup>详细分析了高重频干扰对激光导引头内部 AGC、光电探测器等部件的干扰机理;罗威、华磊和薛建国等<sup>[19-21]</sup>分别在分析高重频干扰的基础上,建立了背景噪声模型和高重频干扰有效概率模型,并分析了高重频干扰对不同编码体制的影响;徐炜波等<sup>[22]</sup>建立了锁定跟踪阶段的波门诱偏干扰模型;王云萍等<sup>[23-24]</sup>通过实验与理论分析,探讨了高重频信号频率与能量对导引头性能的影响;赵乾等<sup>[25]</sup>建立了高重频

激光对激光导引头解码效能的量化评估模型。

以上分析模式虽然对半主动激光导引头在测角方法上进行了改进和完善,但还存在以下 2 点不足。1) 开环建模局限:现有方法多采用开环建模思路,缺乏外界输入与内部计算的动态耦合机制。2) 内部参数无法表征:现有模型仿真仅限于输出最终模型结果,无法有效体现整个仿真过程中不同模型参数的动态变化。

鉴于上述问题,本文提出了半主动激光导引头数字化仿真平台的设计思路,旨在建立具备参数实时可调的半主动激光导引头数字化平台,对标武器装备数字化转型。对于不同的设计、仿真与测试要求,通过数字化平台动态调整参数来进行实验,从而实现在仿真环境中先行分析,随后再进行生成测试的灵活设计验证方式。

## 1 激光导引头数字化仿真平台总体框架

针对半主动激光导引头数字化设计,建立切合实际的物理系统和硬件参数是关键。本文通过构建激光传输等关键子模型,可以实现从激光输入到角度解算的全链路闭环仿真,能够有效表征内部数据,并基于 MATLAB 开发参数动态可调的实时仿真平台,最后通过综合性能评估来验证模型准确性及系统整体性能,数字化仿真平台总体框架如图 1 所示。

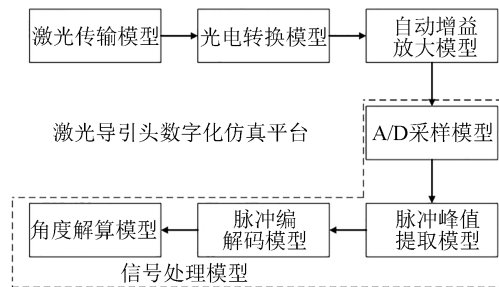


图 1 激光导引头数字化仿真平台总体框架

Fig. 1 Overall framework of the digital simulation platform of laser seekers

仿真平台将脉冲信号作为输入, 用来真实模拟制导与干扰信号。整个系统的响应过程如下: 1) 激光传输模型给定所需信号参数及导引头硬件参数; 2) 四象限探测器对脉冲信号进行光电转换; 3) 自动增益对转化后的电信号进行放大; 4) A/D 采样是对放大后的信号进行模数转换; 5) 在脉冲峰值提取阶段, 对每个脉冲电信号序列中的峰值电压及其对应的时间戳进行提取; 6) 在脉冲编码匹配阶段, 将提取到的时间信息与预设的时间间隔进行匹配, 筛选出有效脉冲信号; 7) 角度解算模型则通过和差比幅测角原理, 根据各象限接收到的光功率密度分布计算出俯仰角和偏航角。

## 2 激光导引头数字化建模

### 2.1 激光传输模型

根据制导激光的大气传播过程以及激光经过漫反射进入导引头的基本原理, 当制导激光照射到导引头透镜面中心点时, 激光的透射过程如图 2 所示。

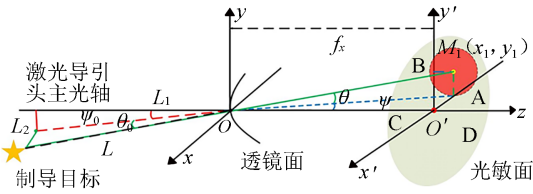


图 2 外界激光传播入导引头模型

Fig. 2 Process of propagation of an external laser into the seeker

以导引头光学透镜的中心点作为坐标原点  $O$ , 设定导引头主光轴为  $z$  轴, 垂直于导引头光轴向上方向定义为  $y$  轴, 同时依据右手定则确定  $x$  轴的方向。假设目标与激光制导导弹连线的距离为  $L$ , 目标与激光制导导弹光学透镜的中心点  $O$  在主光轴面上的水平距离为  $L_1$ 、垂直距离为  $L_2$ , 目标相对于激光制导导弹光学透镜中心点  $O$  的俯仰角为  $\theta_0$ 、偏航角为  $\psi_0$ , 则目标相对于激光制导导弹主光轴中心点的角关系为

$$\begin{cases} \psi_0 = \arctan \frac{L_2}{L_1} \\ \theta_0 = \arccos \frac{\sqrt{L_1^2 + L_2^2}}{L} \end{cases} \quad (1)$$

在光学透镜坐标系  $O-xyz$  中, 制导激光入射进导引头时相对于光敏面坐标系  $O'-x'y'z'$  的俯仰角和

偏航角分别记作  $\theta$ 、 $\psi$ 。其中, 俯仰角  $\theta$  表征激光束在  $y'z'$  平面上与  $z'$  轴的夹角, 而偏航角  $\psi$  则描述了激光束在  $x'z'$  平面上的投影与  $z'$  轴之间的夹角。由对角原理可得

$$\begin{cases} \theta = \theta_0 \\ \psi = \psi_0 \end{cases} \quad (2)$$

为表征外界激光在光敏面上形成光斑的位置, 根据图 2 的位置关系可得, 光斑中心  $M_1$  的坐标  $(x_1, y_1)$  与俯仰角  $\theta$  和偏航角  $\psi$  的关系为

$$\begin{cases} x_1 = f_x \times \tan \psi \\ y_1 = \sqrt{f_x^2 + x_1^2} \times \tan \theta \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $f_x$  为光学透镜中心与四象限探测器光敏面之间的距离。

### 2.2 光电转换模型

对于激光导引头而言, 经由目标表面漫反射的激光信号进入导引头后, 在四象限探测器的光敏面上形成光斑。当光斑的能量超过预设的阈值时, 探测器通过光电转换生成四路电信号。

假设激光进入导引头后在光敏面上形成的光斑功率概率密度为  $\rho_d$ , 导引头光学系统透过率为  $\alpha$ , 四象限探测器响应率为  $R_d$ , 光斑分布在光敏面四象限的面积为  $S_i (i = A, B, C, D)$ , 则根据功率密度与电路转换关系可得激光引起四象限探测器光电转换产生的电流信号为

$$I_i = R_d \times \alpha \times \rho_d \times S_i \quad (4)$$

通过转换电路对电流信号进行放大并做压流转换, 转换后的四象限电压为

$$E_i = K_e \times I_i \times R_T \quad (5)$$

式中:  $R_T$  为压流转换系数;  $K_e$  为电路放大系数。

### 2.3 自动增益放大模型

自动增益放大是一种采用闭环反馈机制动态调节系统增益从而维持输出电压信号变化幅度稳定的技术。为确保光电转换后的电压信号在 A/D 采样区间内, 设经光电转换后的四象限电压为  $E_{\text{sum}}$ , 则增益输出  $E_p$  为

$$E_p = G \times E_{\text{sum}} \quad (6)$$

式中:  $G$  为时变增益, 可根据输入信号  $E_{\text{sum}}$  进行动态调整, 其控制信号  $V_c$  为

$$\tau \frac{dV_c}{dt} + V_c = K \times (V_{\text{ref}} - |E_p|) \quad (7)$$

式中:  $\tau$  为时间常数;  $K$  为环路增益系数;  $V_{\text{ref}}$  为增益放大参考电压。通过求解式 (7) 可得时变增益  $G$  为

$$G = G_0 \times e^{-aV_c} \quad (8)$$

式中:  $a$  为增益因子;  $G_0$  为初始增益。

## 2.4 信号处理模型

在激光导引头的信号处理模块中, 其主要任务是对增益放大后的电压脉冲信号进行数字化处理, 旨在对信号进行甄别, 进而实现测角定位。该过程主要包括 3 个核心部分, 分别为 A/D 采样、脉冲峰值提取和脉冲解码。

### 2.4.1 A/D 采样模型

A/D 采样包含离散、采样、量化和编码 4 个部分, 旨在将自动增益输出信号进行转化, 其输出精度由采样频率和采样位数决定。

设增益输出  $E_p$  的离散信号为  $E'_p$ , 量化信号为  $q$ , 采样位数为  $N_q$ , 则量化输出为

$$q = \frac{E'_p}{V_q/2^{N_q}} \quad (9)$$

式中:  $V_q$  为模数转化基准电压。

### 2.4.2 脉冲峰值提取模型

脉冲峰值提取的目标是从一系列脉冲序列中准确识别出峰值电压及其对应的时间戳, 该步骤提供关于信号的类型、到达时间及能量强度等关键信息。

设一个信号周期内对应 A/D 采样后的电压幅值序列为  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 。其中,  $n$  为一个脉冲周期内的采样长度, 则

$$V_{\text{peak}} = \max(V) \quad (10)$$

此时, 可认为  $V_{\text{peak}}$  是该信号周期内对应 A/D 转换电压序列数组中电压变化的最大幅值,  $t$  为该峰值电压对应的时间。

### 2.4.3 脉冲编解码模型

激光脉冲的编解码技术是目前导引头抗干扰的主要措施。脉冲解码是将先前提取的时间序列与预设的时间间隔进行匹配, 以此来区分有效脉冲信号与无效数据。不同码型的选取适用于不同条件, 本文采用精确频率码进行仿真设计, 其抗干扰体现在将每个角度脉冲峰值电压对应的时间间隔进行匹配。

设提取到的脉冲幅值序列为  $\{V_{\text{peak},1}, V_{\text{peak},2}, \dots, V_{\text{peak},j}\}$ , 对应的时间序列为  $\{t_1, t_2, \dots, t_j\}$ , 若连续 3 个时刻满足

$$t_j = t_1 + \Delta t \times (j-1) + \epsilon \quad (11)$$

式中:  $\Delta t$  为相邻脉冲的时间间隔;  $\epsilon$  为脉冲间隔偏差。当偏差  $\epsilon$  不大于  $\pm 10^{-6}$  s 时, 则可以认为该脉冲序列时序符合预先装订的脉冲编码, 该信号数

据可用于后续测角运算。

### 2.4.4 角度解算模型

光斑信号在光敏面的位置如图 3 所示。其中,  $R$  表示光敏面的半径,  $r$  表示光斑的半径,  $(x_1, y_1)$  表示光斑中心  $M_1$  的坐标。

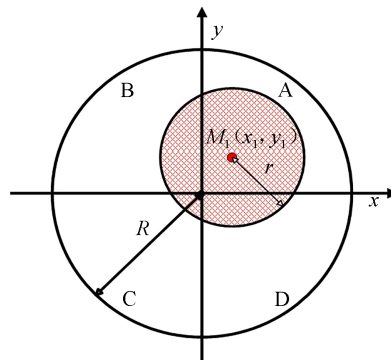


图 3 光斑信号在四象限的分布

Fig. 3 Distribution of spot signals in the four-quadrant

根据和差比幅测角原理, 可以测出光斑中心相对于光敏面中心在横轴和纵轴方向上的偏移量  $\delta x$  和  $\delta y$  分别为

$$\begin{cases} \delta x = \frac{E_A + E_D - E_C - E_B}{E_A + E_B + E_C + E_D} \\ \delta y = \frac{E_A + E_B - E_C - E_D}{E_A + E_B + E_C + E_D} \end{cases} \quad (12)$$

然而, 根据公式 (12) 求出的偏移量  $\delta x$ 、 $\delta y$  并不是真正的光斑中心点坐标, 其与偏移量之间存在着非线性关系, 需通过实验拟合得到。本文参考文献 [12], 对光斑在不同象限的面积进行划分, 运用几何法得出光斑中心与偏移量  $\delta x$ 、 $\delta y$  的关系为

$$\begin{cases} x_1 \approx \frac{\pi \times r}{4} \times \delta x \\ y_1 \approx \frac{\pi \times r}{4} \times \delta y \end{cases} \quad (13)$$

结合式 (3)、(12) 和 (13), 当  $x_1 \ll f_x$  时, 可得俯仰角和偏航角近似为

$$\begin{cases} \psi \approx \frac{\pi \times r}{4 \times f_x} \times \frac{E_A + E_D - (E_C + E_B)}{E_A + E_B + E_C + E_D} \\ \theta \approx \frac{\pi \times r}{4 \times f_x} \times \frac{E_A + E_B - (E_C + E_D)}{E_A + E_B + E_C + E_D} \end{cases} \quad (14)$$

高重频干扰是当下有源干扰的重要手段, 其形成光斑的过程与制导激光类似, 区别在于两者形成的光斑半径和到达探测器的光功率密度不同, 即信号在光电转换后的能量存在明显差异。如图 4 所示, 当高重频干扰激光入射到光敏面上形成光

斑时, 将该光斑近似为圆形。

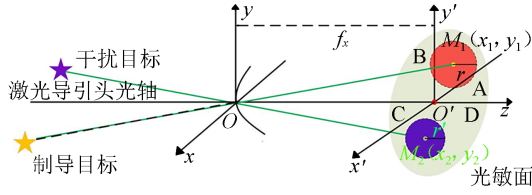


图4 高重频干扰激光传播入导引头模型

Fig. 4 Process of high-repetition frequency interference laser propagation into the seeker

设高重频干扰激光形成的光斑中心  $M_2$  的坐标为  $(x_2, y_2)$ , 半径为  $r'$ , 功率密度为  $\rho_g$ 。在高重频干扰激光光斑与制导光斑同步的条件下, 根据功率密度非线性叠加原理, 可得高重频干扰下的测角模型为

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_{com} \approx \frac{\pi \times r_{com}}{4 \times f_x} \times \frac{E_A + E_D + E_{A-g} + E_{D-g} - (E_C + E_B + E_{C-g} + E_{B-g})}{E_A + E_B + E_C + E_D + E_{A-g} + E_{B-g} + E_{C-g} + E_{D-g}} \\ \theta_{com} \approx \frac{\pi \times r_{com}}{4 \times f_x} \times \frac{E_A + E_B + E_{A-g} + E_{B-g} - (E_C + E_D + E_{C-g} + E_{D-g})}{E_A + E_B + E_C + E_D + E_{A-g} + E_{B-g} + E_{C-g} + E_{D-g}} \end{array} \right. \quad (15)$$

式中:  $E_{i-g}$  ( $i = A, B, C, D$ ) 为高重频光斑在不同象限产生的电压;  $\theta_{com}$  和  $\psi_{com}$  分别为在高重频干扰下测得的俯仰角和偏航角;  $r_{com}$  为高重频干扰下的复合光斑半径。

由于光斑面积在整个光敏面上的占比较大, 复合光斑的半径近似等于制导激光光斑半径, 为简化处理, 设定在高重频干扰下复合光斑的半径  $r_{com} \approx r_0$ 。

### 3 仿真与分析

#### 3.1 数字平台设计

为有效表征实际导引头内部数据流向及其工作过程, 根据上述数学模型搭建了 Simulink 仿真模型, 如图5所示。

针对数字化平台可实时修改系统参数的要求, 结合 MATLAB 仿真工具开发了与上述 Simulink 模型兼容的终端, 如图6所示。该仿真终端可实时调整导引头硬件参数、制导信号参数、干扰信号参数以及编解码参数设置, 经平台运行后输出上述

数字模型信号及探测器实时光斑图像、测角结果和对应的偏差信息, 从而可以准确地表征导引头内部信号的传递过程及其工作机理。

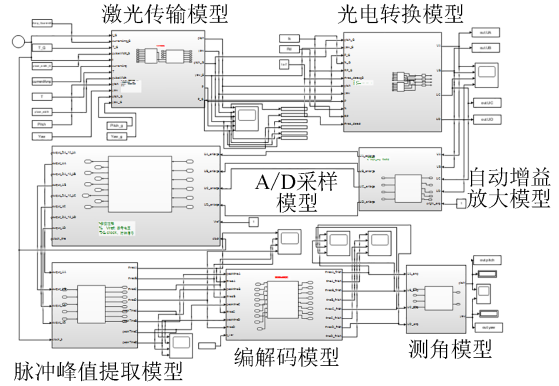


图5 Simulink 仿真模型

Fig. 5 Simulink simulation model

#### 3.2 平台精度分析

##### 3.2.1 测角精度分析

根据实际物理系统参数, 设置导引头光学组件透过率  $\alpha = 1$ , 四象限探测器光敏面半径  $R = 5 \text{ mm}$ , 探测器响应度  $R_d = 1.5 \times 10^4 \text{ V/W}$ , 压流转换系数  $R_T = 10$ , 放大系数  $K_e = 1$ , 光学透镜中心与四象限探测器光敏面之间的距离  $f_x = 23.5 \text{ mm}$ , 光斑功率密度为  $\rho_d = 1 \text{ W/m}^2$ , 脉冲信号频率为  $10^6 \text{ Hz}$ , 精确频率间隔为  $2.2 \times 10^{-5} \text{ s}$ 。

在仿真过程中, 因负半轴数据与正半轴数据的输出结果数值相等、符号相反, 所以仅以正半轴数据作为输入。设制导激光的入射俯仰角  $\theta_0$  的取值范围为  $0^\circ \sim 6^\circ$ , 仿真步长  $\Delta\theta_0 = 0.02^\circ$ , 偏航角  $\psi_0 = 0^\circ$ 。参考文献[6]可知, 在探测器光敏面上的光斑直径为  $0.4286R \sim 0.5714R$ 。因此, 本文取光斑半径  $r = 2.85 \text{ mm}$ 。为使光斑不至于偏向某一象限导致光斑部分能量在探测器外而无法被接收, 假定本次仿真生成的光斑始终在四象限探测器的跟踪区域内。

为准确表征激光信号在四象限探测器光敏面上的形成过程, 采用限定区域划分的方法, 在为后续平台设计提供可视化结果的同时, 便于求解四象限探测器模型的输出信号。划分网格数量  $N$  分别取 64、128 和 256, 当  $N$  取 128 时的光敏面区域划分结果如图7所示。测角精度与网格划分数量的关系如图8所示。

从图8中可以看出, 网格划分得越密集, 角度测算时发生数值突变的情况也就越少, 曲线也更

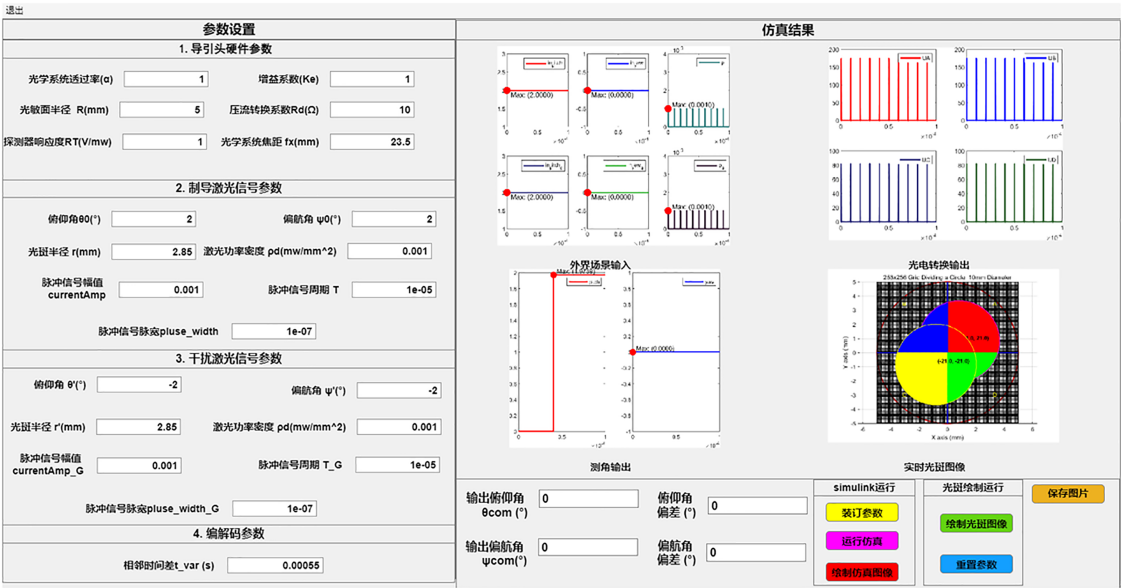


图 6 仿真终端

Fig. 6 Simulation terminal

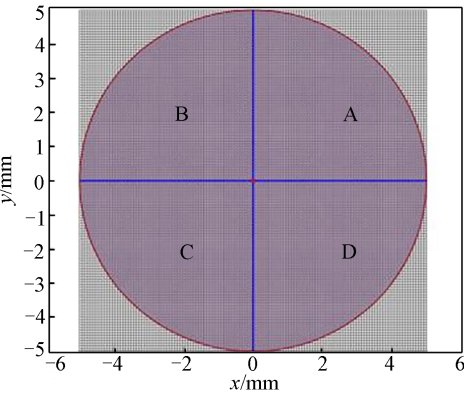


图 7 四象限光敏面网格划分 (N=128)

Fig. 7 Grid division of four-quadrant photosensitive surface (N=128)

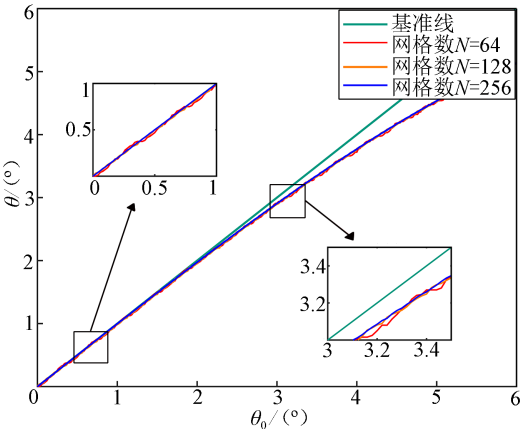


图 8 光敏面划分与测角精度关系

Fig. 8 Relationship between photosensitive surface division and angle measurement accuracy

加平滑。同时，由表 1 中的数字平台测角指标分析

可得，网格数量  $N$  越大则单个角度解算所占用的平均时间  $T$  也就越长，而均方根误差 RMSE 在逐渐减小。所以根据实际硬件条件约束和测角精度要求，为得到准确的测角结果，本文设置网格划分数量为 256 个。

表 1 数字平台测角指标

| Table 1 Goniometric metrics for digital platform |         |         |         |
|--------------------------------------------------|---------|---------|---------|
| $N$                                              | 64      | 128     | 256     |
| RMSE                                             | 0.323 8 | 0.316 2 | 0.312 7 |
| $T/s$                                            | 0.26    | 0.57    | 4.01    |

此外，进一步分析可得，当测角范围超出  $\pm 2.5^\circ$  时，无论如何细化网格都无法得到准确的计算结果。这是由于当测角过大时，公式 (13) 已经不能满足  $x_1 \ll f_x$  的极限条件，所以该测角模型已经不再适用。当输入角度为  $\pm 6^\circ$  时，本文测角模型输出的角度偏差占输入角度的 14.47%，此时若继续增加输入角度将导致测量误差直线上升，输出测角结果已无意义。

3.2.2 测角误差修正

为将测角模型的测量范围扩展至  $\pm 6^\circ$ ，本文对实际角度测算残差进行了多项式拟合，得到的拟合结果为

$$\gamma = 0.000\ 1\sigma^5 + 0.002\ 7\sigma^4 + 0.006\ \sigma^3 + 0.007\ 4\sigma^2 - 0.001\ \sigma - 0.000\ 5 \tag{16}$$

式中： $\gamma$  为多项式拟合残差后的补偿因子； $\sigma$  为拟

合变量。

将多项式拟合计算得到的偏差作为补偿因子, 对平台测角结果进行修正。图9为加入多项式拟合修正后的输出角度与输入角度的对比曲线。由图中局部放大图可以看到, 经过修正后的输出结果与输入之间的误差明显减小, 修正后的曲线几乎与基准曲线完全重合, 从而证明了误差修正的有效性。

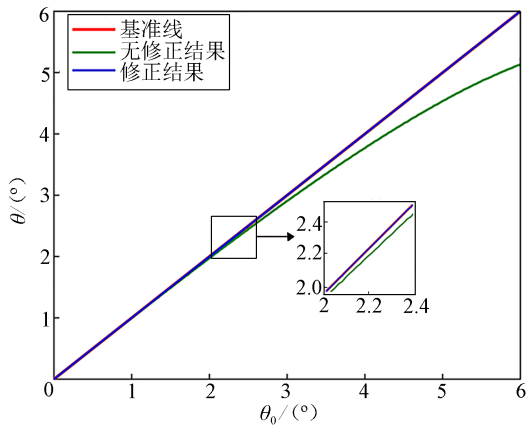


图9 校正结果与输入对比

Fig. 9 Comparison between the correction result and input

图10为使用五阶多项式修正后的角度偏差。从图中可以看到, 输出偏差 $e_{ss}$ 的数量级基本稳定在 $10^{-3}$ , 满足对测角精度的要求。另外, 选取不同阶数的多项式对测角结果进行拟合, 发现当使用更高阶的多项式拟合时会导致局部拟合过度, 反而使误差增加, 而低阶多项式拟合又无法得到准确的补偿因子。因此, 本文最终选择五阶多项式对测角结果进行拟合。

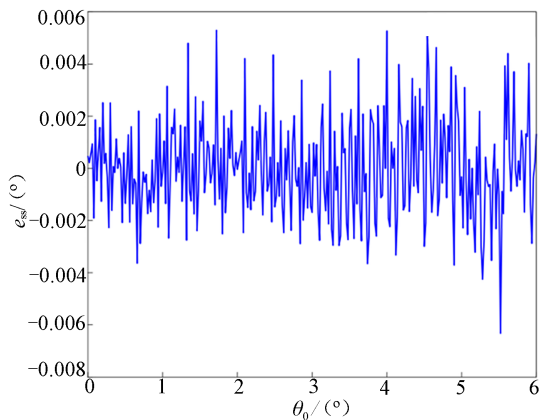


图10 五阶多项式修正后的角度偏差

Fig. 10 Angle deviation after correction using a fifth-order polynomial

### 3.3 平台功能验证

本文所设计的激光导引头数字化平台所具备的重要功能之一是能够准确表征外界干扰对系统的影响。设置外界高重频干扰激光的入射俯仰角 $\theta'$ 分别为 $0^\circ$ 和 $2^\circ$ , 偏航角 $\psi' = 0^\circ$ 。制导激光的入射俯仰角 $\theta_0$ 的取值范围为 $0^\circ \sim 3^\circ$ , 高重频干扰激光在光敏面上形成的光斑半径 $r' = 2.85 \text{ mm}$ 、功率密度 $\rho_g = 1 \text{ W/m}^2$ , 其他参数设置同3.2.1节。通过数字化仿真平台得到高重频激光干扰下俯仰角 $\theta_{com}$ 的测量结果如图11所示。

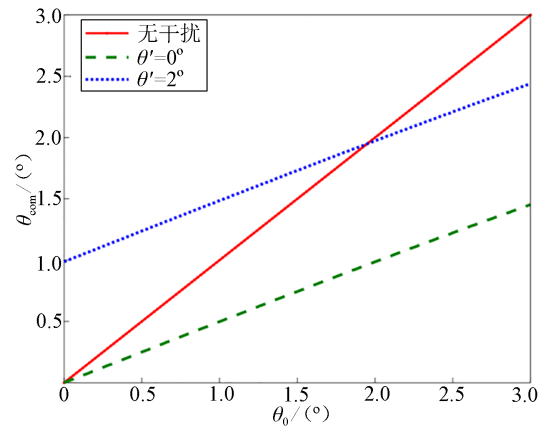


图11 高重频激光干扰下的角度测算结果

Fig. 11 Angle measurement results under high repetition frequency interference

从图11可以看出, 高重频激光对四象限探测器测角的干扰具有不可回避性和难以实时修正的特点。在光斑功率密度非线性叠加的情况下, 该干扰激光会直接影响测角精度, 导致导引头无法准确定位目标。在实际系统中, 可通过脉冲激光编码、时间波门技术和信号处理算法等手段, 实现对高重频干扰的有效识别与抑制, 从而提升测角抗干扰能力。

将高重频干扰激光的入射俯仰角 $\theta'$ 和偏航角 $\psi'$ 均设置为 $-3^\circ$ , 同时设置制导激光的俯仰角 $\theta_0$ 和偏航角 $\psi_0$ 为 $3^\circ$ , 根据图6的仿真终端得到的2个光斑在光敏面上的位置如图12所示。

从图12可以直观看到制导激光信号和高重频干扰信号在光敏面上形成光斑的实时图像。其中, 左下角为高重频干扰激光在四象限探测器光敏面上形成的有效光斑, 与图中右上侧的制导激光光斑在4个象限区域内发生非线性叠加, 致使探测器无法有效区分真实制导信号与干扰信号。此种叠加效应会导致初始采样电信号失真, 进而引发测角计算出现错误, 最终造成导引头对目标定位的

偏差。

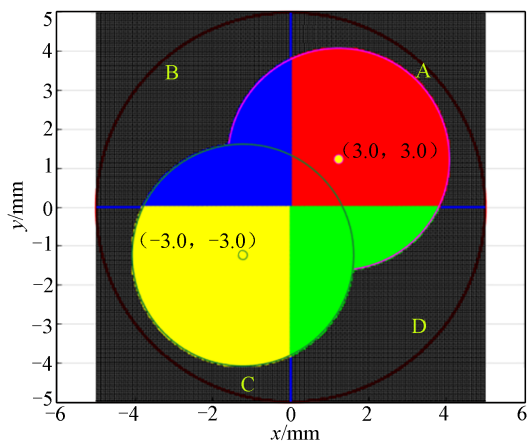


图 12 高重频干扰下形成的光斑

Fig. 12 Spot patterns formed under high repetition frequency interference

## 4 结论

本文旨在构建能表征半主动激光导引头实际工作过程的数字化仿真平台，主要结论如下。

1) 在分析激光导引头工作原理的基础上，研究并构建了激光导引头的激光传输、光电转换、自动增益放大、信号处理及测角模型，实现了激光导引头内部信号数据流全链路传递分析，并基于高重频干扰原理，建立了高重频干扰条件下的测角模型。

2) 综合各数字模型，设计了参数可调、数据动态分析的激光导引头数字化仿真平台。经检验，该平台支持不同导引头硬件参数修改与仿真测试需求，为导引头的测试和验证提供了一个高效、灵活的虚拟仿真平台。通过该平台，可对导引头在不同干扰环境下的工作过程进行实时数据分析与过程验证，为半主动激光制导武器数字化平台建设提供了参考。

## 参考文献

- [1] 徐涛, 宋敬华, 李亮, 等. 装备数字化试验发展研究[J]. 新技术新工艺, 2022(9): 15-19.  
XU T, SONG J H, LI L, et al. Research on development of the equipment digital test[J]. New Technology & New Process, 2022(9): 15-19.
- [2] 任璐英, 李铁成, 唐耀, 等. 2023 年美国武器装备数字化转型建设进展分析[J]. 军民两用技术与产品, 2024(4): 24-27.
- [3] 卫旭芳, 刘彬. 美军数字工程建设发展研究及启示

[J]. 航空兵器, 2023, 30(3): 56-66.

WEI X F, LIU B. Research on the development of US military digital engineering and its enlightenment[J]. Aero Weaponry, 2023, 30(3): 56-66.

- [4] 陈建伟, 杨春雷, 杨亮, 等. 美军数字工程最新进展及趋势分析研究[J]. 导弹与航天运载技术, 2023(1): 153-156.

CHEN J W, YANG C L, YANG L, et al. Research on the latest progress and trend of US military digital engineering[J]. Missiles and Space Vehicles, 2023(1): 153-156.

- [5] 王巍巍, 王乐. 美国数字工程战略发展分析[J]. 航空动力, 2022(5): 23-26.

WANG W W, WANG L. Analysis to the development of U.S. digital engineering strategy[J]. Aerospace Power, 2022(5): 23-26.

- [6] 陈召远, 刘延飞, 高旻, 等. 面向量子通信的时间相位编码集成硅光芯片设计[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38(6): 99-104.

CHEN Z Y, LIU Y F, GAO Y, et al. Design of time-phase encoded silicon photonics integrated chip for quantum communication[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2024, 38(6): 99-104.

- [7] 陈成, 赵良玉, 马晓平. 激光导引头关键技术发展现状综述[J]. 激光与红外, 2019, 49(2): 131-136.

CHEN C, ZHAO L Y, MA X P. State-of-art of key technological issues of laser seekers[J]. Laser & Infrared, 2019, 49(2): 131-136.

- [8] 杜亚雯, 董全林, 蒲小琴, 等. 激光半主动导引头光学系统设计与分析[J]. 激光与红外, 2018, 48(12): 1536-1540

DU Y W, DONG Q L, PU X Q, et al. Analysis and design of optical system of laser semi-active seeker[J]. Laser & Infrared, 2018, 48(12): 1536-1540.

- [9] YANG H, XU X B, LUO M Z, et al. Design of quadrant photoelectric detection system and method of displacement calculation[J]. Optik, 2019, 199: 163335.

- [10] 仲启媛, 刘峰, 曹纹诚, 等. 激光半主动制导中光斑对四象限探测器定位精度影响分析[J]. 火箭军工程大学学报, 2024, 38(4): 61-67.

ZHONG Q Y, LIU F, CAO W C, et al. Analysis of the influence of spots on positioning accuracy of four-quadrant detector in the laser semi-active guidance[J]. Journal of Rocket Force University of Engineering, 2024, 38(4): 61-67.

- [11] 唐彦琴, 顾国华, 钱惟贤, 等. 四象限探测器基于

- 高斯分布的激光光斑中心定位算法[J]. 红外与激光工程, 2017, 46(2): 64-70.
- TANG Y Q, GU G H, QIAN W X, et al. Laser spot center location algorithm of four-quadrant detector based on Gaussian distribution[J]. Infrared and Laser Engineering, 2017, 46(2): 64-70.
- [12] 郝林结, 马军山, 金涛. 椭圆光斑在四象限探测器定位算法的研究[J/OL]. 光学仪器, (2024-11-22) [2025-03-02]. <https://link.cnki.net/urlid/31.1504.TH.20241121.1551.002>.
- HAO L J, MA J S, JIN T. Research on localization algorithm of elliptical spot infour quadrant detector[J/OL]. Optical Instruments, (2024-11-22) [2025-03-02]. <https://link.cnki.net/urlid/31.1504.TH.20241121.1551.002>.
- [13] LI X L, YAO W J, ZHU L K, et al. Ground target localization algorithm for semi-active laser terminal correction projectile[J]. Defence Technology, 2016, 12(3): 234-241.
- [14] 张骏, 钱惟贤, 刘泽伟. 四象限探测器输出非均匀性分析与矫正[J]. 红外技术, 2016, 38(7): 565-570.
- ZHANG J, QIAN W X, LIU Z W. Analysis and correction of the output non-uniformity of four quadrant detector[J]. Infrared Technology, 2016, 38(7): 565-570.
- [15] 邱雄, 刘志国, 王仕成. 激光导引头角跟踪误差对激光精确制导的影响[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(5): 124-132.
- QIU X, LIU Z G, WANG S C. Effects of angular tracking error of laser seeker on precise laser guidance[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2020, 54(5): 124-132.
- [16] 邱雄, 王仕成, 刘志国, 等. 激光导引头四象限探测器测角精度的建模研究[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(7): 105-111.
- QIU X, WANG S C, LIU Z G, et al. Modeling research on angle measurement accuracy of four-quadrant detector of laser seeker[J]. Infrared and Laser Engineering, 2020, 49(7): 105-111.
- [17] ZHANG M Y, LIU H, GUAN Y L, et al. Misalignment angle calibration of semi-active laser seeker based on locally weighted scatterplot smoothing and interpolation method[J]. Measurement, 2022, 205: 112182.
- [18] 张帅, 刘志国, 赵乾, 等. 高重频激光对激光导引头的干扰机理研究[J]. 激光与红外, 2015, 45(12): 1467-1472.
- ZHANG S, LIU Z G, ZHAO Q, et al. Research on the jamming mechanism of high repetition laser on laser seeker[J]. Laser & Infrared, 2015, 45(12): 1467-1472.
- [19] 罗威, 杨华兵, 许鹏程, 等. 高重频激光对多激光制导武器干扰机理研究[J]. 激光与红外, 2023, 53(8): 1250-1254.
- LUO W, YANG H B, XU P C, et al. Research on the jamming mechanism of high repetition laser to multiple laser guided weapons[J]. Laser & Infrared, 2023, 53(8): 1250-1254.
- [20] 华磊, 庄永峰, 朱国利, 等. 高重频激光干扰技术机理分析[J]. 红外, 2014, 35(2): 21-25.
- HUA L, ZHUANG Y F, ZHU G L, et al. Analysis of high repetition laser jamming technology [J]. Infrared, 2014, 35(2): 21-25.
- [21] 薛建国, 陈勇. 高重频激光对激光导引头的干扰研究[J]. 航空兵器, 2006(3): 30-32.
- XUE J G, CHEN Y. Research on the jamming effect of the high repetition laser to the laser guidance[J]. Aero Weaponry, 2006(3): 30-32.
- [22] 徐炜波, 刘志国, 王仕成, 等. 高重频激光对激光导引头干扰过程的建模研究[J]. 激光与红外, 2021, 51(1): 29-33.
- XU W B, LIU Z G, WANG S C, et al. Modeling the interference process of laser seeker with high-repetition laser[J]. Laser & Infrared, 2021, 51(1): 29-33.
- [23] 王云萍, 张海洋, 郑星元, 等. 高重频激光对激光制导武器的干扰机理分析[J]. 激光技术, 2014, 38(1): 21-25.
- WANG Y P, ZHANG H Y, ZHENG X Y, et al. Analysis of the interference mechanism of high-frequency lasers on laser guided weapons[J]. Laser Technology, 2014, 38(1): 21-25.
- [24] 王云萍, 张海洋, 郑星元, 等. 高重频激光对激光导引头的干扰机理实验研究[J]. 北京理工大学学报, 2014, 34(8): 858-863.
- WANG Y P, ZHANG H Y, ZHENG X Y, et al. The experimental research of the jamming effect of high-repetition-laser for laser seeker[J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2014, 34(8): 858-863.
- [25] 赵乾, 刘志国, 王仕成, 等. 高重频激光对激光导引头解码干扰的研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1438-1443.
- ZHAO Q, LIU Z G, WANG S C, et al. Jamming effect of high repetition laser on laser guidance's decoding[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(5): 1438-1443.

(编辑: 刘建民)