

doi: 10.7690/bgzd.2019.03.013

激光干扰红外成像制导导弹的仿真系统

王吉, 王健

(南京理工大学能源与动力工程学院, 南京 210094)

摘要: 为解决激光对红外成像制导导弹干扰特性的问题, 对其制导导弹的仿真系统进行分析。根据目标在红外探测器上成像的原理, 采用形心跟踪法对目标进行信息提取与跟踪, 应用 Simulink 分别构建目标成像模型、制导信息提取模型、导弹飞行模型和激光干扰模型, 通过建立导弹正常飞行弹道和在激光干扰后的干扰弹道, 对影响激光器的干扰因素进行仿真分析。仿真结果表明, 该分析可对重要目标的防护工程提供参考。

关键词: 红外成像; 干扰; 饱和阈值; 激光; 比例导引

中图分类号: TJ765.4 **文献标志码:** A

Simulation System of Laser Jamming to Infrared Imaging Guidance Missiles

Wang Ji, Wang Jian

(School of Energy & Power Engineering, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: In order to solve the problem of laser jamming to infrared imaging guidance missiles, a simulation system of the guidance missile was made. According to the principle of target imaging on infrared detector, the centroid tracking method was used to extract information and track the target. Target imaging model, guidance information extraction model, missile flight model, and laser jamming model were constructed respectively based on Simulink. By establishing the normal flight trajectory and the jamming trajectory after laser jamming, the factors affecting laser jamming are simulated and analyzed. The simulation result offers a reference for the protective engineering of important facilities.

Keywords: infrared imaging; interference; saturation threshold; laser; proportional navigation

0 引言

红外成像制导导弹以其优越的制导性能和较强的抗干扰能力, 成为各国军事发展的重点^[1]。为了应对红外成像制导导弹的威胁, 使用激光对抗红外成像制导导弹是一种行之有效的方法。按辐照强度, 激光对抗可以分为硬杀伤和软杀伤。硬杀伤可以直接破坏导引头的硬件结构, 效率高, 速度快, 但是高能激光器技术含量高, 造价十分昂贵。相比之下, 软杀伤不破坏目标导引头的硬件, 但可以使其不能正常成像, 丢失对目标的跟踪, 达到战略效果^[2]。对于激光软杀伤的研究: 一方面可从实验出发研究激光器对成像探测器的辐照特性^[3-5]; 另一方面可从计算机仿真的角度出发, 研究仿真总体建模架构^[6]、效果分析^[7-9]和评估方法^[10-11]。相比实验, 使用计算机建模仿真具有周期短、成本低、易于修改参数等优点, 方便进行分析。

笔者建立导弹的飞行模型, 分析目标在红外探测器上成像过程的基本原理, 研究激光对探测器的干扰机理, 总结激光的发散角、功率以及激光的起始干扰时间对激光干扰效果造成的影响, 可为提高

激光器对重要目标的保护效果提供借鉴。

1 仿真总体流程

如图 1, 激光对红外成像导弹的干扰实际上是对导引头的干扰, 其过程为: 导引头发现并锁定目标后, 利用目标图像信息生成控制信号, 导引导弹飞向目标; 由激光器发射激光照射在导引头上, 利用激光在探测器上形成的光斑扰乱导引头的成像信息, 使导弹不能获得有效的目标信息而偏离飞行轨迹, 达到干扰目的。

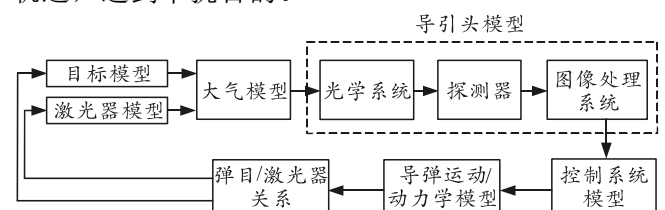


图 1 仿真总体流程

2 系统建模原理

2.1 目标成像原理

导引头视域内的物体发射红外线, 经过大气的衰减和光学系统的折射, 汇聚在探测器上, 探测器

收稿日期: 2018-12-11; 修回日期: 2019-01-16

作者简介: 王吉(1994—), 男, 湖南人, 硕士, 从事导弹干扰仿真研究。

经过光电转化生成数字图像，系统对图像进行预处理，检测并提取目标信号，最终生成控制信号。处理后获得目标与背景的数字图像，笔者采用简化模型，使用投影的方法生成目标和背景的二值图像，以此为基础进行分析。

将目标近似看成在地面上的正方形，提取边上的点为目标特征点。通过将坐标系平移、旋转特定欧拉角，可以实现空间不同坐标系之间的转化。根据成像原理，采用地面坐标系 I $OXYZ$ 、地面坐标系 II $OX_1Y_1Z_1$ ，弹体坐标系 $OX_dY_dZ_d$ ，光轴坐标系 $OX_gY_gZ_g$ 、探测器平面坐标系 OY_lZ_l 和像元坐标系 OY_iZ_i 来描述目标到探测器表面的投影关系。转换关系如图 2 所示。

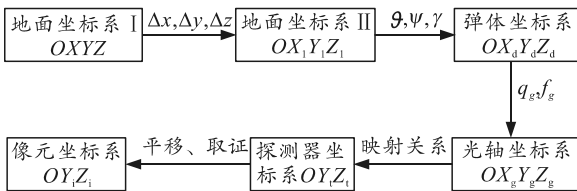


图 2 坐标系转化关系

其中地面坐标系 I 为惯性坐标系，地面坐标系 II 与地面坐标系 I 平行，原点在导弹质心上。 φ 、 ψ 、 γ 分别为导弹俯仰、偏航、滚转角。光轴坐标系原点在探测器光学视点上(近似为与质心重合)， OX_g 轴指向目标， OY_g 轴在过 OX_g 的铅垂平面内并与 OX_g 垂直，向上为正， OZ_g 轴符合右手法则。 q_g 为 OX_g 与平面 OX_dZ_d 的夹角， f_g 为 OX_g 在平面 OX_dZ_d 的投影与 OX_d 的夹角。设目标特征点在光轴坐标系上的坐标为 (x_g, y_g, z_g) ，则目标在探测器平面上的坐标为

$$(y_l, z_l) = \left(f \times \frac{y_g}{x_g}, f \times \frac{z_g}{x_g} \right) \quad (1)$$

其中 f 为光学系统的焦距。

目标特征点在像元坐标系上理想的成像位置为

$$(i, j) = \left(\text{int} \left[\left(z_l + \frac{D}{2} \right) \times \frac{n}{D} \right], \text{int} \left[\left(y_l + \frac{D}{2} \right) \times \frac{n}{D} \right] \right) \quad (2)$$

其中： D 为探测器的长宽； n 为探测器每行的像元数目； $\text{int}()$ 为取整函数，在 Matlab 环境下，可选取 $\text{ceil}()$ 取整函数。考虑到红外成像导引头的跟踪精度，目标点在探测器上的成像位置为

$$\left. \begin{aligned} i &= i_1 + \Delta i \\ j &= j_1 + \Delta j \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

其中： Δi 、 Δj 与导引头的特性有关，也与离目标的距离有关，距离越远，目标的成像误差越大；反之，则越小。

2.2 目标信息的提取

导弹采用的导引率不同，需要的制导信息也不同，如弹目距离、目标加速度、相对速度等。获取这些信息可以使导弹精度更高，也会让导引头的结构复杂化，增加制造成本。比例导引法所需要的信息少，只需测量视线角速度，工程上易于实现，是大部分导弹所采取的制导方式。其基本形式为

$$\dot{\sigma} = k\dot{q} \quad (4)$$

其中： $\dot{\sigma}$ 为导弹速度的法向加速度； \dot{q} 为视线角速度。

采用形心跟踪法对目标图像进行提取信息与跟踪，当目标的形心位置不在探测器平面中央时将产生误差信号，平台伺服系统驱动电机，调整探测器方向，使探测器光轴对准目标位置。目标的形心位置为：

$$\left. \begin{aligned} \bar{m} &= \frac{\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n z_l(k,l) \times f(k,l)}{M} \\ \bar{n} &= \frac{\sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n y_l(k,l) \times f(k,l)}{M} \\ M &= \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n f(k,l) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

其中： $z_l(k,l)$ 、 $y_l(k,l)$ 分别为目标 (k,l) 处特征点在探测器坐标上的横、纵坐标； $f(k,l)$ 为特征点的权重，在文中取为 1。

误差信号表示如图 3 所示。

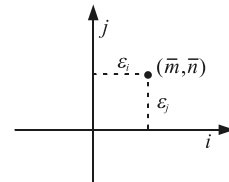


图 3 误差信号

如图 4 所示，比例导引法需要获得弹目关系的视线角速度，平台导引头可通过控制系统框架角的转动来获得视线角速度信息。

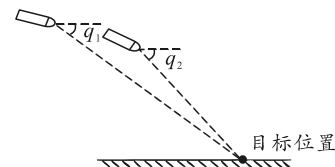


图 4 视线角示意图

假设控制系统为理想的情况，以俯仰方向为例，当导弹在 t_k 时间运动至 A 点时，其视线与水平面的夹角为 q_1 ；在 t_{k+1} 时间运动至 B 点，视线与水平面的夹角为 q_2 。则视线角速度为

$$\dot{q} = \frac{dq}{dt} \approx \frac{q_2 - q_1}{t_{k+1} - t_k} \quad (6)$$

2.3 导弹弹道方程的建立

导弹的飞行方程组由运动学方程、动力学方程、几何关系方程和控制方程组成，可以描述导弹飞行过程中的姿态、位置和受力状况。根据导引头测量的目标位置信息和生成的导引信号，自动驾驶仪驱动舵机改变舵片偏角，从而改变导弹空气力矩，达到调整方向的目的。给定导弹的状态和位置初值，导弹即可按比例导引法飞向目标，可获得导弹在没有干扰的状态下的弹道曲线。

2.4 激光干扰模型的建立

2.4.1 激光在探测器上光斑直径的计算

激光经激光器的发射，到达导引头时的光束半径为

$$r_1 = L\theta \quad (7)$$

其中： L 为激光器到导弹的距离； θ 为激光发散角，由激光衍射后发散角 θ_y 、大气抖动扩展角 θ_1 以及激光源抖动角 θ_d 组成，其关系为：

$$\theta = \sqrt{\theta_y^2 + \theta_1^2 + \theta_d^2} \quad (8)$$

$$\theta_y = 1.22 \frac{\lambda}{D_0} \beta \quad (9)$$

其中： λ 为激光波长； D_0 为孔径； β 为光质量因子。

2.4.2 激光干扰成像导引头的机理

激光以一定功率从激光器中发射，经过大气衰减、导引头光学系统的折射后投射到探测器上。探测器接收到的功率密度：

$$p = \frac{0.84\tau\tau_1PS_1}{\pi r_1^2 S_2} \quad (10)$$

其中： τ 为激光大气透过率； τ_1 为光学系统（整流罩和滤光片）透过率； S_1 为光学系统面积； S_2 为探测器面积； P 为激光器功率。大气透过率 τ 可用专业的大气仿真软件计算，也可由式(11)进行估算：

$$\tau = \exp\left\{\left(\frac{1.667}{R_v}\right) \frac{[\exp(-0.835y) - 1]}{0.835y/L}\right\} \quad (11)$$

其中： y 为导引头所处高度，km； R_v 为大气能见度，km，文中取 3 km； L 为激光器到导弹的距离。

当光斑完全覆盖探测器时，若激光到达探测器表面的功率大于探测器像元饱和阈值，则激光可干扰目标的成像，导引头无法获取目标位置的准确信息；当激光光斑面积小于探测器面积时，即使激光

光斑未覆盖目标图像，但因为“光饱和串音”现象，溢出的光生电子会沿着电荷转移方向扩散，使得未受激光照射的探测器区域成像紊乱，导引头无法提取目标的有效信息，导弹偏离而脱靶。

3 模型建立与仿真

使用 Simulink 建立导弹正常飞行弹道和在激光干扰后的干扰弹道。导弹的初始参数为：发射点坐标 (0,200,400)，初速为 400 m/s，方向平行于地面坐标系 I 的 Ox 轴，3 个姿态角均为 0。目标为地面上大小为 20 m×20 m 的正方形，中心点在 (5 000,0,0)。探测器饱和阈值为 0.4 W/cm²，光学系统焦距为 279 mm，直径为 0.1 m。设导弹在距离目标 8 m 以内即可引爆摧毁目标。

设激光发散角为 1 mrad，不同距离与所需激光器最低发射功率的关系如图 5 所示。由图可知：激光器离导弹的距离越远，要达到探测器饱和阈值所需要的激光发射功率越大，且距离越大，每增加单位距离所需激光器功率越高，故应根据已有激光器的发射功率，合理选择激光器的布设位置。

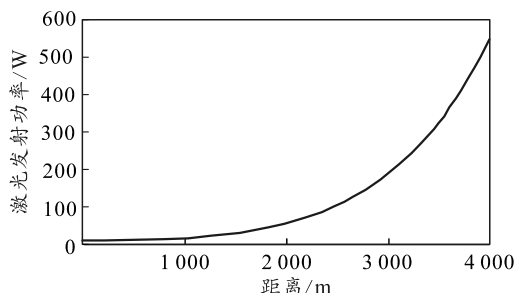


图 5 距离和激光发射功率关系

激光发散角影响激光的聚能程度，当发散角越小，聚能程度越高，能在更远的距离上使探测器像元达到饱和。图 6 给出了当激光功率为 30 W、距离为 3 000 m 时，激光功率密度与激光发散角的关系。由图可知，激光的发散角越小，激光功率密度越大。如果探测器饱和阈值为 0.4 W/cm²，则要达到饱和和激光发散角约为 0.13 mrad。

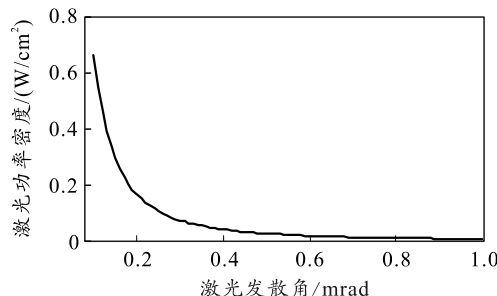


图 6 激光发散角与激光功率关系

Precision Airdrop System Advanced Concept Technology Demonstration[C]. 18th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar. 2005: 1601.

- [3] RICHARD B, JOSEPH M G, JACLYN M H, et al. DoD JPADS Programs Overview & NATO Activities[C]. 19th AIAA Aerodynamic Decelerator Systems Technology Conference and Seminar, 21-24 May 2007, Williamsburg, VA. 2007: 2576.

- [4] 杜毓琛, 郭占海, 刘虹秋, 等. 弹药系统术语: GJB102A-1998[S]. 北京: 国防科学技术工业委员会,

1998: 40.

- [5] 安维廉, 宋天莉, 徐德坤, 等. 地地弹道式导弹命中精度评定方法: GJB6289-2008[S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2008: 1.
- [6] 葛余博. 概率论与数理统计[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 64-65.
- [7] OLEG Y. Statistical Analysis of Touchdown Error for Self-Guided Aerial Payload Delivery Systems[C]. AIAA Aerodynamic Decelerator Systems (ADS) Conference, 25-28 March 2013, Daytona Beach, Florida. 2013: 1265.

(上接第57页)

图7为激光器发射功率为30W, 激光发散角为1mrad, 激光器位置为(4800,0,0)时, 导弹正常飞行轨迹和受到干扰之后的运动轨迹。未受到干扰时, 导弹的最后坐标为(4993,0.41,0.74), 当导弹受到干扰时, 最终落点坐标为(4944, 8.5,0), 可知激光在受到干扰之后, 飞行方向有明显的偏移。

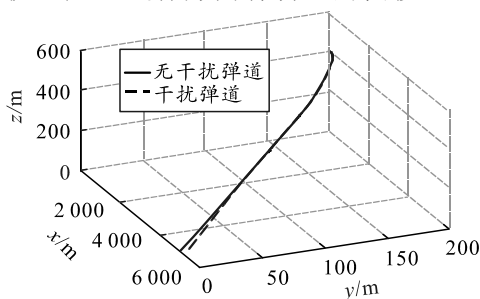


图7 正常弹道和干扰弹道

若激光发射功率足够大, 激光器起始干扰时间与脱靶量的关系曲线如图8所示。由图可知: 激光器起始干扰时间越晚, 由于导弹距离防护目标更近, 导弹成像系统精度提高, 所以导弹受到干扰后弹道的偏引量越少, 干扰效果越差; 而当起始干扰时间较早时, 导弹距离较远, 干扰能引起较大的脱靶量。

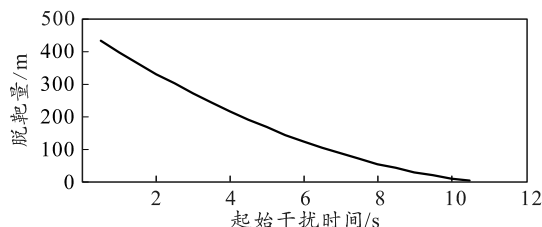


图8 干扰起始时间和脱靶量的关系

4 结论

针对激光对红外成像制导弹的干扰, 需根据

激光器的发射功率, 结合所能对抗导弹的防御等级和来袭方向, 选择合适的装备位置, 尽量减少相对距离, 选择发散角较小的激光器可提高作战距离; 此外, 应当提高告警系统和反应系统的灵敏度, 减少延迟时间, 及时发现来袭目标, 启动时间越早, 干扰效果越明显。

参考文献:

- [1] 吕洁, 罗勇, 卿松, 等. 红外制导技术在空空导弹中的应用分析[J]. 兵器装备工程学报, 2017, 38(12): 70-74.
- [2] 高巍巍. 红外成像系统激光干扰的图像仿真与效果评估[D]. 西安: 电子科技大学, 2011.
- [3] 刘延武, 李楠, 吕俊伟. 激光对成像制导系统的干扰[J]. 弹箭与制导学报, 2013, 33(5): 23-25.
- [4] 王领, 张斌, 雷威. 激光对 CCD 导引头的干扰仿真实验[J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(1): 41-44.
- [5] 王世勇. 激光对 CCD 探测器干扰损伤的研究及模糊评估[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2002.
- [6] 张晓阳, 付奎生, 孟卫华, 等. 空空导弹红外成像导引头建模与仿真[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(22): 5133-5136.
- [7] 贺元兴, 李建, 穆佰利, 等. 高斯激光对红外成像制导系统的干扰效果分析[J]. 光电工程, 2014, 41(10): 1-6.
- [8] 李华, 秦石乔, 贾宏进, 等. 红外成像制导弹激光压制干扰数学仿真评估方法分析[J]. 红外技术, 2006, 28(9): 540-544.
- [9] 殷艳华, 王学伟. 强激光干扰红外成像制导弹效能仿真研究[J]. 红外技术, 2008, 30(1): 18-20.
- [10] 李海燕, 朱敏, 何友金, 等. 激光对红外制导弹干扰仿真与效果评估[J]. 激光与红外工程, 2008, 37(6): 1034-1037.
- [11] 党红恩, 李浩, 赵尔平, 等. 激光干扰成像制导弹研究[J]. 光电与控制, 2016, 23(3): 41-44.