

诱饵弹作用后导引头成像特征建模及跟踪性能分析

郭冰涛¹, 王晓蕊¹, 王小兵², 袁宏学², 杨红坚²

(1. 西安电子科技大学 物理与光电工程学院, 陕西 西安 710071;

2. 中国人民解放军 63870 部队, 陕西 华阴 714200)

摘要: 基于红外成像导引头信号传递和转换机理, 分析了影响导引头输出图像特征的主要因素, 并在此基础上分析了红外诱饵弹作用导引头成像特征的机理; 借助端到端成像建模思想, 综合考虑诱饵弹对目标表面辐射特性及导引头增益特性的影响, 建立了诱饵弹作用后导引头成像特征量化模型; 以理论模型为基础, 借助计算机三维场景仿真技术, 实现了诱饵弹作用后导引头成像及跟踪特性实时仿真, 并基于仿真结果分析了不同发射方向诱饵弹对导引头跟踪性能的影响。结果表明: 诱饵弹发射方向不同, 诱饵弹对导引头跟踪性能的影响程度不同; 当诱饵弹相对目标运动方向的发射角为 $75^\circ \sim 95^\circ$ 、 $190^\circ \sim 215^\circ$ 和 $250^\circ \sim 280^\circ$ 时, 诱饵弹对导引头跟踪性能的影响程度最大; 当诱饵弹相对目标运动方向的发射角为 $10^\circ \sim 40^\circ$ 、 $150^\circ \sim 170^\circ$ 和 $315^\circ \sim 325^\circ$ 时, 诱饵弹对导引头跟踪性能的影响程度最小。

关键词: 红外诱饵弹; 红外成像导引头; 辐射特性; 增益特性; 跟踪性能

中图分类号: TN972 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)07-2027-07

Analysis of imaging features and tracking performance of seeker after decoys jamming

Guo Bingtao¹, Wang Xiaorui¹, Wang Xiaobing², Yuan Hongxue², Yang Hongjian²

(1. School of Physics and Optoelectronic Engineering, Xidian University, Xi'an 710071, China;

2. No. 63870 Unit of PLA, Huayin 714200, China)

Abstract: The main factors that affect the imaging characteristic of infrared imaging seeker and the jamming principle of infrared decoys on the imaging characteristic of infrared imaging seeker were analyzed based on signal transfer and conversion mechanism of infrared imaging seeker. Then, with the end-to-end imaging modeling ideas, and considering the impact of infrared decoys on the radiative properties of target surface and the auto gain characteristics of infrared imaging seeker, the imaging characteristics quantitative model of infrared imaging seeker was established. Furthermore, on the basis of theoretical analysis mentioned above, the real-time simulation of the output images and tracking features of infrared imaging seeker after infrared decoys jamming was carried out by computer 3D scene simulation technology, and the tracking performance of the infrared imaging seeker was studied based on the simulation results. The results show that the jamming effect of infrared decoys on the tracking

收稿日期: 2014-11-15; 修订日期: 2014-12-20

基金项目: 国家自然科学基金(61007014, 61377007)

作者简介: 郭冰涛(1988-), 男, 博士生, 主要从事光电成像建模与仿真方面的研究工作。Email: gbtedu@sina.com

导师简介: 王晓蕊(1976-), 男, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事光电成像系统工程优化设计、协同仿真、性能测试与评估等方面的研究工作。Email: xrwang@mail.xidian.edu.cn

performance of infrared imaging seeker varies with the launching direction of infrared decoys. The infrared decoys show the greatest jamming effect when the launching angle of infrared decoys are about 75° – 95° 、 190° – 215° or 250° – 280° , while infrared decoys show the least jamming effect when the launching angles of infrared decoys are about 10° – 40° 、 150° – 170° or 315° – 325° .

Key words: infrared decoys; infrared imaging seeker; radiation characteristic; gain characteristic; tracking performance

0 引言

随着红外成像技术的发展,红外成像制导导弹越来越显示出其巨大的作战威胁力,这导致了红外干扰技术的出现及迅猛发展^[1],世界各国都积极发展各种人工干扰方法来削弱红外制导武器的作战性能^[2]。目前,利用红外诱饵弹对付红外成像制导导弹已经成为目前战场中一种常用的干扰手段^[3]。为提高我国红外成像制导导弹抗干扰能力防护,实现红外诱饵弹干扰红外成像导引头成像特征量化建模,并在此基础上科学评价红外诱饵弹干扰后导引头的跟踪性能是十分必要而迫切的,它能够为提高我国红外导引头抗干扰防护能力研究提供理论依据与数据支持。

近年来,世界各国都非常重视红外诱饵弹干扰红外导引头作战性能的研究,并取得了许多卓有成效的研究成果。从国内外公开的文献来看,这些研究主要是基于红外诱饵弹的光谱特性、峰值强度、作用时间、投放时间间隔、弹道特性等,定量分析不同工作方式、工作波段红外诱饵弹对导引头目标检测、识别、跟踪性能的影响^[4–6]。现有的研究作为红外导引头抗干扰能力评估、新型红外成像导引头的方案设计以及改进方向提供了理论依据和数据参考,但仍存在以下不足之处:没有综合考虑红外诱饵弹对目标表面辐射特性及导引头增益特性的影响;对红外诱饵弹干扰导引头跟踪性能的研究以理论分析为主,没有建立完善的红外诱饵弹干扰后导引头跟踪特性实时仿真模型。然而在实际战场环境中,诱饵弹作为一种强辐射源必然会影响到目标表面的辐射特性及导引头的增益特性,因此为研究红外诱饵弹对导引头跟踪性能的影响,必须考虑诱饵弹辐射对目标表面辐射特性及导引头增益特性的影响。此外,实现红外诱饵弹作用后导引头跟踪特性实时仿真,能够更加直观、科学、准确地评估红外成像导引头的抗干扰能力。

针对上述不足之处,文中综合考虑诱饵弹对目标表面辐射特性和导引头增益特性的影响,研究了诱饵弹对导引头输出图像特征的影响;依据红外成像导引头跟踪回路的工作原理,研究了红外诱饵弹干扰后导引头跟踪特性实时仿真,并在此基础上分析了不同发射方向红外诱饵弹对导引头跟踪性能的影响。

1 红外成像导引头跟踪系统工作原理

为研究红外诱饵弹对红外成像导引头跟踪性能的影响,有必要了解红外成像导引头跟踪系统的工作原理。红外成像导引头跟踪系统一般由红外成像系统、信号处理系统和稳定控制系统三部分组成^[9],如图1所示。红外成像系统的主要作用是实时获取并输出目标及其背景的红外图像信息。信号处理系统主要任务是对红外成像系统获取的红外图像进行图像预处理、图像特征分析、目标识别、目标位置解算等。稳定控制系统的主要作用是根据接收到目标位置信息指导导弹的运动,并保证导弹在每一飞行段稳定的飞行。

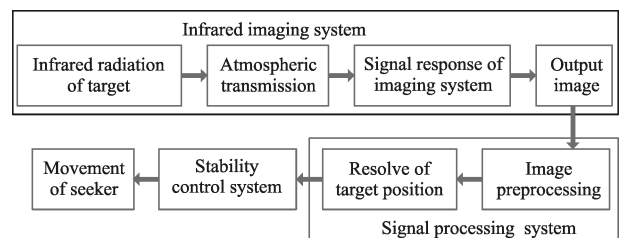


图1 红外成像导引头的基本工作原理

Fig.1 Main principle of infrared imaging seeker

从红外成像导引头跟踪系统的工作原理可以看出:红外成像系统输出图像特征是影响到红外成像导引头跟踪精度的一个重要因素。文中通过分析诱饵弹对导引头成像特征的影响机理,建立了诱饵弹作用后导引头成像特征量化模型,并基于理论模型研究诱饵弹对导引头跟踪性能的影响。

2 红外诱饵弹作用后导引头成像特征建模

2.1 导引头成像特征量化原理分析

为研究红外诱饵弹对导引头成像特征的影响,有必要了解导引头成像特征量化原理。依据红外成像系统信号传递转换特性,未受到红外诱饵弹干扰时,温度为 T 的目标经红外成像系统响应后产生的灰度图像特征为:

$$G_r = \frac{255}{V_{\max} - V_{\min}} (V - V_{\min}) \quad (1)$$

$$V = G_s \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) \frac{\pi L(\lambda, T)}{4F^2(1+M_0)^2} \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) A_s d\lambda \quad (2)$$

式中: V_{\min} 和 V_{\max} 为成像系统电压信号量化范围; G_s 为成像系统增益; λ_1 和 λ_2 为成像系统光谱响应范围; $R(\lambda)$ 为成像系统探测元的响应度; $M(\lambda, T)$ 为目标表面辐射出射度; F 为光学系统的 f 数; M_0 为光学系统放大率; $\tau_o(\lambda)$ 为光学系统的光谱透过率; $\tau_a(\lambda)$ 为目标与成像系统之间大气的光谱透过率; A_s 为成像系统探测元的几何光敏面积; $L(\lambda, T)$ 为目标表面的辐射亮度。

从导引头成像特征量化原理可以看出:对于设计的或已研制定型的成像导引头,影响目标成像灰度特征的主要因素有目标表面辐射亮度 $L(\lambda, T)$ 、成像系统增益 G_s 及大气透过率 $\tau_o(\lambda)$ 。其中,目标表面辐射亮度 $L(\lambda, T)$ 主要与目标表面温度、发射率、反射率、太阳辐射及其他自然或人工辐射源有关^[9];成像系统增益 G_s 主要与系统接收到的辐射能量有关^[10];大气透过率主要与大气中大气分子(如 CO_2 、水蒸汽等)浓度、气溶胶浓度等有关。

由此可见,红外诱饵弹作为一种强辐射源,一方面可以影响目标表面辐射亮度 $L(\lambda, T)$,另一方面可以通过导引头成像系统接收到的辐射能量,影响系统增益,最终导致成像系统输出图像特征发生变化。因此,文中通过定量分析红外诱饵弹对目标表面辐射特性的影响及导引头增益特性的影响,建立了诱饵弹作用后导引头成像特征量化模型。

2.2 红外诱饵弹作用目标表面辐射特性建模

为准确表征红外诱饵弹对目标表面辐射特性的影响,必须引入双向反射率(BRDF)的概念^[11]。其数学表达式为:

$$r(\lambda) = \frac{L_r(\lambda)}{E_i(\lambda)} \quad (3)$$

其单位为 sr^{-1} 。 $E_i(\lambda)$ 和 $L_r(\lambda)$ 分别为辐射源在目标表面产生的辐射照度及目标表面在观测方向产生的辐射亮度。大量实验测量结果证明:由 Robert L. Cook 等人提出的 Cook-Torrance 双向反射率模型,能够准确表征目标表面的散射特性^[12],因此,文中选用该模型分析诱饵弹对目标表面辐射特性的影响。Cook-Torrance 双向反射率模型的表达式为:

$$r(\lambda) = k_d(N \cdot L) + k_s \frac{\rho(\lambda)}{\pi} \frac{C_l}{(N \cdot L)} \frac{G_l}{(N \cdot W)} \quad (4)$$

式中: $C_l = \frac{\exp\{-\tan^2 \alpha / \sigma^2\}}{\sigma^2(N \cdot H)^4}$, $H = \frac{L+W}{|L+W|}$; $G_l = \min\left\{1, \frac{2(N \cdot H)(N \cdot W)}{(W \cdot H)}, \frac{2(N \cdot H)(N \cdot L)}{(W \cdot H)}\right\}$; k_d 和 k_s 分别为

目标表面漫反射和镜面反射系数,即漫反射能量和镜面反射能量占总反射能量的比例, $0 \leq k_d \leq 1$, $0 \leq k_s \leq 1$,且 $k_s + k_d = 1$; $\rho(\lambda)$ 为目标表面的菲涅耳反射系数; C_l 为目标表面粗糙度分布函数; G_l 为目标表面遮蔽因子; σ 为目标表面粗糙度因子; N 、 L 和 W 分别为材质表面法向量、入射光反方向和观测方向的单位向量; H 为 L 和 V 向量的单位角平分向量, α 为 H 与 N 之间夹角。各角度和向量的定义如图 2 所示。

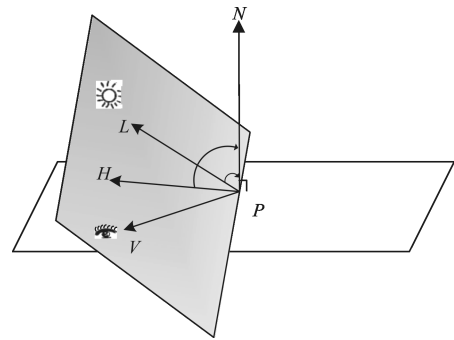


图 2 Cook-Torrance 双向反射率模型各角度和向量的定义

Fig.2 Angles and vectors for Cook-Torrance BRDF

根据双向反射函数的定义及红外辐射立体角投影定律,可以计算出强光源作用后目标表面在观测方向产生的辐射亮度为:

$$L'(\lambda, T) = \frac{r(\lambda) \varepsilon_d(\lambda) M_b(\lambda, T_d) \tau_d(\lambda) A_d \cos \theta}{2} + L(\lambda, T) \quad (5)$$

式中: $\varepsilon_d(\lambda)$ 为诱饵弹的光谱发射率; T_d 为诱饵弹的温度; $\tau_d(\lambda)$ 为诱饵弹与目标表面之间大气的光谱透过率; l 为诱饵弹与目标表面之间的距离; A_d 为诱饵弹火焰在目标表面入射光方向投影面积; $M_b(\lambda, T_d)$ 为温度为 T_d 的黑体产生的辐射出射度; θ 为诱饵弹辐

射在目标表面的入射角。

2.3 红外诱饵弹作用导引头增益特性建模

为研究红外诱饵弹对导引头增益特性的影响,有必要了解导引头成像系统中自动增益控制电路工作原理。自动增益控制电路的引入主要为了提高系统成像动态范围,使系统能够显示目标与背景之间的微小辐射差异,同时防止目标临近信号增强时出现饱和现象,从而提高导引头对军事目标的侦察和感知能力^[13]。其主要工作原理如图 3 所示。成像系统探测元响应接收到的辐射能量产生电压信号 V ,经自动增益控制电路后输出最大(或平均)电压信号为 V_i ,系统通过将 V_i 与参考信号 V_{ref} 进行对比,对系统增益进行调节。当 $V_i > V_{ref}$ 时,系统增益值 G_s 下调;当 $V_i < V_{ref}$ 时,系统增益值 G_s 上调。

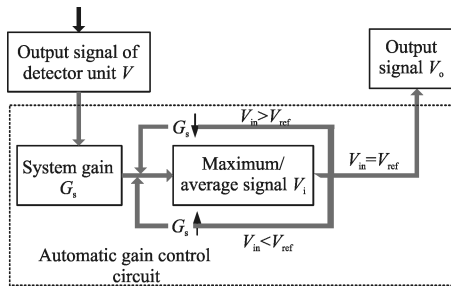


图 3 自动增益电路工作原理

Fig.3 Principle of automatic gain control circuit

由导引头自动增益控制电路工作原理可以看出,成像系统输出的灰度图像特征与接收到的辐射能量有关。假设无红外诱饵弹干扰时,系统增益为 G_s ,温度为 T 的目标经成像系统响应后产生信号为 V 。当诱饵弹辐照时,系统产生的最大(或平均)电压信号发生变化,导致系统增益自动调整,其调整的幅度与自动增益控制电路工作前诱饵弹产生的电压信号密切相关。自动增益控制电路工作前诱饵弹产生的电压信号可表示为:

$$V_d = G_s \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) \frac{\varepsilon_d(\lambda) M_b(\lambda, T_d)}{4\pi F^2 (1 + M_o)^2} \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) A_s d\lambda \quad (6)$$

假设 $V_d/V_{ref} = n$,则诱饵弹作用后,系统增益调整为 $G_s' = G_s/n$,或者根据 n 确定系统增益所在的档位区间。此时目标辐射经系统响应后产生的电压信号及灰度特征可表示为:

$$V' = G_s' \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) \frac{\pi L'(\lambda, T)}{4F^2 (1 + M_o)^2} \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) A_s d\lambda \quad (7)$$

$$G_r' = \frac{255}{V_{max} - V_{min}} (V' - V_{min}) \quad (8)$$

2.4 红外诱饵弹作用导引头成像特征建模

综合考虑诱饵弹对目标表面辐射特性和导引头增益特性的影响,结合公式(5)、(7)、(8),可以计算出温度为 T_d 的诱饵弹作用后目标成像灰度图像特征为:

$$G_r'' = \frac{255}{V_{max} - V_{min}} (V'' - V_{min}) \quad (9)$$

$$V'' = G_s'' \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} R(\lambda) \frac{\pi L'(\lambda, T)}{4F^2 (1 + M_o)^2} \tau_o(\lambda) \tau_a(\lambda) A_s d\lambda \quad (10)$$

式中: V_{min} 和 V_{max} 为成像系统电压信号量化范围; G_s' 为诱饵弹作用后成像系统增益; $R(\lambda)$ 为成像系统探测元的响应度; $L'(\lambda, T)$ 为诱饵弹作用后目标表面在观测方向产生的辐射亮度; F 为光学系统 f 数; M_o 为光学系统放大率; $\tau_o(\lambda)$ 为光学系统光谱透过率; $\tau_a(\lambda)$ 为目标与成像系统之间大气的光谱透过率; A_s 为成像系统探测元的几何光敏面积。

3 红外诱饵弹作用导引头跟踪特性实时仿真

为直观、科学、准确地评价红外诱饵弹对红外成像导引头跟踪性能的影响,文中以上述理论模型为基础,模拟了红外诱饵弹作用后导引头成像系统输出图像特征,并依据导引头跟踪系统工作原理,实现了红外诱饵弹作用导引头跟踪特性实时仿真。具体仿真过程如下:

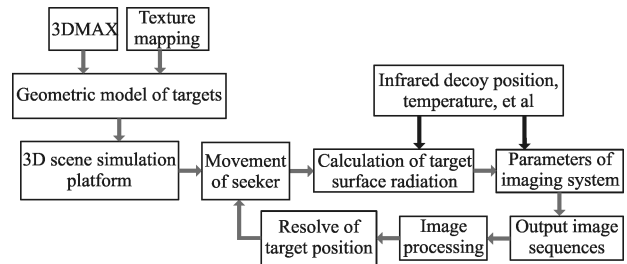


图 4 红外诱饵弹作用导引头跟踪特性实时仿真流程

Fig.4 Real-time simulation process of tracking features of infrared imaging seeker after impacted by infrared decoys

(1) 场景建模

利用 3dMax 软件生成目标的三维几何模型,并利用材质贴图技术配置目标模型表面的材质信息(如温度、发射率、反射率、粗糙度等);将模型导入三维场景仿真平台,实时计算导引头运动过程中目标

表面辐射信息,并结合已研制或设计的红外成像系统的参数,根据公式(1)~(2),将目标表面辐射信息转化成灰度成像特征。

(2) 红外诱饵弹作用后目标表面辐射特性建模

利用三维场景仿真平台的粒子系统建立诱饵弹的三维几何模型。设定场景仿真平台输出图像帧频,在图像渲染的每一帧,根据诱饵弹的位置、导引头位置以及目标表面面元的位置和法线方向向量 N (目标表面面元的位置和法线方向在利用 3DMax 建立几何模型时就已确定),可以实时计算目标表面面元处的入射光反方向的单位向量 L 、观测方向的单位向量 W 及诱饵弹与目标之间的距离 l 。结合诱饵弹的温度、发射率及目标表面的反射率等信息,根据公式(6)可以实时计算出在目标表面面元在观测方向产生的辐射亮度 $L'(\lambda, T)$ 。

(3) 诱饵弹作用后系统输出图像灰度特征建模

在图像渲染的每一帧,根据诱饵弹位置判断诱饵弹是否位于系统视场内:当诱饵弹位于系统视场外时,则系统自动增益档位不变;当诱饵弹位于系统视场内时,则根据诱饵弹温度、发射率及系统参数,计算诱饵弹产生的电压信号,根据公式(7)计算系统增益值或系统增益所在的档位区间;

(4) 红外诱饵弹作用后导引头运动特征建模

针对导引头运动过程中场景仿真平台渲染的序列帧图像,每隔特定帧图像进行一次图像处理:通过阈值分割及跟踪算法计算目标在图像中的跟踪点位置,并结合成像系统位置、焦距等参数,调整导引头的运动俯仰角、方位角等参数。

4 红外诱饵弹作用导引头跟踪特性仿真

为进一步研究红外诱饵弹对红外成像导引头跟踪性能的影响,文中根据上述红外诱饵弹作用导引头跟踪特性实时仿真模型,模拟了诱饵弹干扰下某型号红外成像导引头输出图像,结合特定跟踪算法,实现了诱饵弹作用导引头跟踪特性实时仿真,并基于仿真结果定量分析了红外诱饵弹对导引头跟踪性能的影响。其中成像系统参数设置如下:响应波段范围 $3\sim 5\ \mu\text{m}$,探测元响应度 $R=4\times 10^5\ \text{V/W}$,探测元几何光敏面积 $A_s=25\times 25\ \mu\text{m}^2$,光学系统的 f 数 $F=1.6$,光学系统的光谱透过率 $\tau_o=0.9$,光学放大率 $M_o=1$,

系统自动增益变化范围 $10^3\sim 10^4$,电压量化范围 $0\sim 10\ \text{V}$,成像帧频 $100\ \text{Hz}$ 。诱饵弹参数设置如下:发射率 $\varepsilon_d=0.68$,诱饵弹火焰表面积为 $0.5\sim 2.5\ \text{m}^2$,实验测量诱饵弹燃烧不同时刻的温度曲线如图 5 所示,发射数量 10 枚,初始速度 $10\ \text{m/s}$ 。

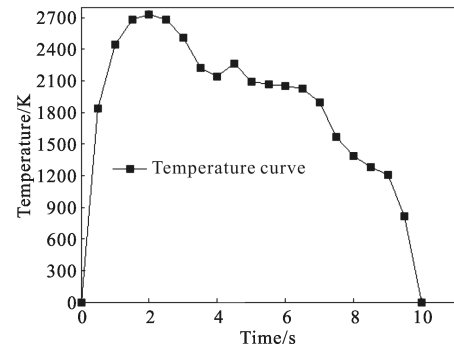


图 5 实测诱饵温度变化曲线

Fig.5 Measured temperature curve of infrared decoy

4.1 红外诱饵弹作用红外成像导引头成像特征仿真结果

为定量研究红外诱饵弹对导引头成像特征的影响,文中模拟了诱饵弹作用后导引头输出图像。设置目标位置(6 000 m, 1 500 m, 8 000 m),导引头位置(6 000 m, 1 480 m, 7 900 m),目标与导引头均静止,仿真结果如图 6 所示。图 6(a)为诱饵弹发射前,成像系统输出图像模拟结果;图 6(b)~(f)为诱饵弹发射后不同时刻,成像系统输出图像模拟结果。

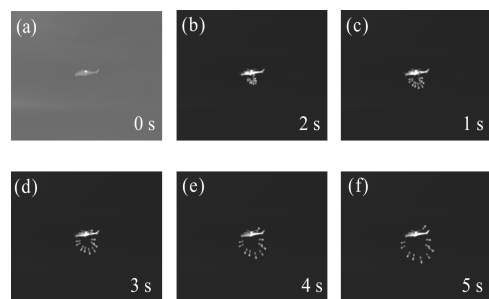


图 6 诱饵弹发射后不同时刻导引头成像仿真结果

Fig.6 Imaging simulation results of infrared imaging seeker at different moments after launching decoy

从仿真结果可以看出:红外诱饵弹作用后导引头成像系统输出图像特征发生明显变化:一方面目标表面由于受到诱饵弹辐照的影响导致部分目标表面成像灰度明显增大,并且随着诱饵弹与目标之间距离的增大,诱饵弹辐照对目标成像灰度的影响降低;另一方面由于诱饵弹辐照导致导引头增益档位

下降,部分目标表面及其背景成像灰度下降。红外成像导引头主要基于成像系统输出图像特征实现对目标的跟踪,因此诱饵弹对导引头成像系统输出图像特征的影响,最终会影响导引头的跟踪性能。

4.2 红外诱饵弹作用导引头跟踪特性仿真结果

为定量研究诱饵弹对导引头跟踪性能的影响,文中在诱饵弹作用后系统成像特征仿真结果的基础上,结合波门跟踪算法^[14],对诱饵弹作用后导引头跟踪特性进行了实时仿真。设置目标初始位置(6 000 m, 1 500 m, 8 000 m),目标运动速度 250 km/h,目标运动方向单位向量(0.6, 0, 0.8)。导引头初始位置(0 m, 1 400 m, 0 m),导引头运动速度 3 600 km/h,视场角 $4^\circ \times 3^\circ$ 。导引头图像处理频率 10 Hz。诱饵弹发射点位置(6 000 m, 1 498 m, 8 000 m),诱饵弹发射后不同时刻导引头跟踪特性仿真结果如图 7 所示,图中方框表示跟踪点位置。图 7(a)表示诱饵弹发射前,导引头跟踪特性模拟结果;图 7(b)~(f)表示诱饵弹发射后不同时刻,导引头跟踪特性模拟结果。

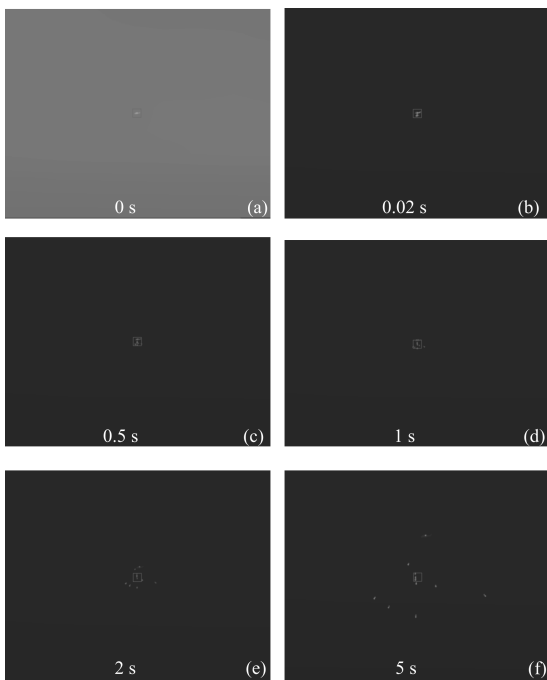


图 7 诱饵弹发射后不同时刻导引头跟踪特性仿真结果

Fig.7 Simulation results of tracking feature of infrared imaging seeker at different moments after launching decoys

从仿真结果可以看出:诱饵弹发射前,导引头跟踪点位置恰好与目标位置重合;诱饵弹发射后 1 s 内,诱饵弹对目标表面辐射特性、系统增益特性的综

合影响,导致目标表面成像灰度相对诱饵弹发射前增大,导引头跟踪点位于目标与诱饵弹之间;诱饵弹发射 1 s 后,随着诱饵弹与目标之间距离增大,诱饵弹对目标表面辐射特性影响降低,诱饵弹作用系统增益特性成为影响目标成像的主导因素,导致目标表面成像灰度相对诱饵弹发射前减小,跟踪点位置逐渐向诱饵弹位置偏移。

4.3 红外诱饵弹作用导引头跟踪性能分析

导引头的跟踪性能与导引头跟踪失调角密切相关^[17]。导引头跟踪过程中跟踪失调角的变化主要与跟踪点位置的变化有关,而导引头跟踪点位置主要受目标表面成像灰度、目标在图像中的位置、诱饵弹成像灰度、诱饵弹在图像中的位置等因素影响。当诱饵弹投射方向不同时,诱饵弹弹道特性不同,导致不同时刻诱饵弹在图像中位置的变化规律、目标表面辐射特性及成像灰度变化规律不同,进一步导致导引头跟踪过程中跟踪点位置及跟踪失调角变化规律不同。

为进一步研究诱饵弹对导引头跟踪性能的影响,文中计算了目标向不同方向投放诱饵弹后,不同时刻导引头跟踪失调角的变化,结果如图 8 所示。图中诱饵弹发射角为诱饵弹发射方向到目标运动方向的顺时针角。

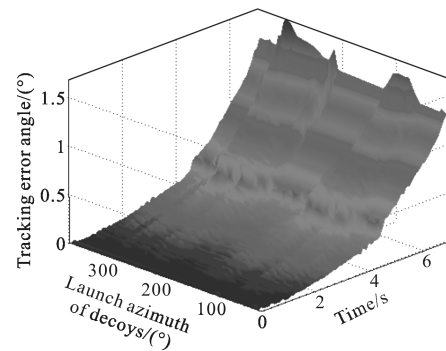


图 8 导引头跟踪过程中跟踪失调角的变化

Fig.8 Seeker tracking error angle curve during tracking process

从计算结果可以看出:(1) 红外诱饵弹发射后,由于诱饵弹自身辐射及诱饵弹对目标表面辐射特性及导引头增益特性的影响,导引头跟踪过程中跟踪点位置逐渐向诱饵弹位置偏移,导致导引头跟踪失调角逐渐变大,导引头跟踪性能降低;(2) 诱饵弹发射角不同,导引头跟踪过程中跟踪失调角变化明显不同:当诱饵弹发射角为 $75^\circ \sim 95^\circ$ 、 $190^\circ \sim 215^\circ$ 和 250°

~280°时,导引头跟踪失调角下降最大,表明发射角为75°~95°、190°~215°和250°~280°时,诱饵弹对导引头跟踪性能的影响最大;当诱饵弹发射角为10°~40°、150°~170°和315°~325°时,导引头跟踪失调角下降最小,表明发射角为10°~40°、150°~170°和315°~325°时,诱饵弹对导引头跟踪性能的影响最大。

5 结论

文中结合目标表面辐射特性及红外成像导引头增益特性,定量分析了红外诱饵弹作用后导引头的成像灰度特征,并结合波门跟踪算法,实现了红外诱饵弹作用后导引头跟踪特性仿真,最后基于仿真结果分析了不同发射方向诱饵弹对导引头跟踪性能的影响。从仿真及计算结果可以看出:(1)诱饵弹自身辐射及其对目标表面辐射特性、系统增益特性的综合影响,导致导引头跟踪点位置偏移,跟踪失调角逐渐变大,跟踪性能降低;(2)诱饵弹发射方向不同,导引头跟踪过程中跟踪失调角变化不同,诱饵弹对导引头跟踪性能的影响程度不同。文中工作可为提高我国红外导引头抗诱饵弹干扰防护能力的评估和研究提供理论依据与数据支持。

参考文献:

- [1] Li Mo, Sun Weiguo, Chen Hongxu, et al. Counter-countermeasure identification based on multi-element dual band infrared detector [J]. *Applied Optics*, 2013, 52(21): 5201-5207.
- [2] Wang Chaozhe, Tong Zhongxiang, Li Lin, et al. Simulation of towed infrared decoy interfering and its operational method [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 446-451. (in Chinese)
- [3] Chen Xiaotian, Shen Zhenkang. Flare recognition for long wave infrared imaging seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5): 622-625. (in Chinese)
- [4] James Jackman, Mark Richardson, Brian Butters, et al. Countermeasure effectiveness against a man-portable air-defense system containing a two-color spintan infrared seeker [J]. *Optical Engineering*, 2011, 50(12): 126401-1-126401-10.
- [5] Chai Shijie, Li Jianxun, Tong Zhongxiang, et al. Modeling of IR seeker for air-to-air missile and anti-interference simulation[J]. *Acta Armamentarii*, 2014, 35(5): 681-690.
- [6] Hu Yifan, Song Bifeng. Evaluation the effectiveness of the infrared flare with a tactic of dispensing in burst [C]//3rd International Symposium on Systems and Control in Aeronautics and Astronautics, 2010: 131-136.
- [7] Wim De Jong, Frans A Dam, Gerard J Kunz, et al. IR seeker simulator and IR scene generation to evaluate IR decoy effectiveness[C]//SPIE, 2004, 5615: 100-111.
- [8] Jan Berggren, Ralf G Kihlen. Model for simulation of IR countermeasure effect on IR-seeker/missile [C]//SPIE, 2004, 5615: 72-83.
- [9] Joseph Meola, Anthony Absi, James D Leonard, et al. Modeling, development and testing of a shortwave infrared supercontinuum laser source for use in active hyperspectral imaging[C]//SPIE, 2013(8743): 8743D-1-8743D-12.
- [10] Meng Xiuyun. Principle of missile guidance and control system [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2003. (in Chinese)
- [11] Ross V, Dion D, St-Germain D. Experimental validation of the MODTRAN 5.3 sea surface radiance model using MIRAMER campaign measurements[J]. *Applied Optics*, 2012(51): 2264-2276.
- [12] Zhu Feihu, Gong Ke, Huo Yujing. A wide dynamic range laser rangefinder with cm-level resolution based on AGC amplifier structure[J]. *Infrared Physics & Technology*, 2012, 55(23): 210-215.
- [13] Yang Yufeng, Wu Zhensen, Cao Yunhua. Scattering characteristics of complex background infrared radiation from a non-lambertian target[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 800-804. (in Chinese)
- [14] Addy Ngan, Fredo Durand, Wojciech Matusik. Experimental analysis of BRDF models [C]//Proceedings of the Eurographics Symposium on Rendering, 2005: 117-226.
- [15] Zheng Zhiwei, Bai Xiaodong, Hu Gongxian, et al. Air-to-air Missile Infrared Guidance Systems Design [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2007. (in Chinese)
- [16] Zou Weijun, Bo Yuming, Chen Yi. Windows tracking technology for an electro-optical tracking and pointing platform [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(4): 602-606. (in Chinese)
- [17] Liu Junhui, Shan Jiayuan, Liu Yongshan. Tracking performance of gyro-stabilized seeker[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 2209-2215. (in Chinese)