

弹道目标识别的红外辐射数据仿真研究

刘俊良, 陈尚锋, 卢焕章, 赵本东, 毋亚北

(国防科学技术大学 ATR 实验室, 湖南 长沙 410073)

摘要: 充足的目标红外辐射数据集是研究弹道目标检测、跟踪与识别的必备前提, 以往弹道目标红外数据仿真模型强调特定参数场景下的光学成像研究, 以解决目标检测和关联跟踪等图像信息处理问题; 而目标识别所需的数据仿真模型更注重在可能的动态参数范围内对目标辐射强度信号变化规律的探究。为了满足目标识别的数据仿真要求, 着重探讨了目标场景参数和辐射强度信号动态变化特性; 并根据仿真结果分析了影响数据差异特性的底层因素, 为设计适合任意仿真场景数据的目标识别算法予以启示。

关键词: 数据仿真; 目标识别; 动态参数

中图分类号: TN219 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.1004002

Research on infrared irradiance data stimulation for ballistic targets recognition

Liu Junliang, Chen Shangfeng, Lu Huanzhang, Zhao Bendong, Wu Yabei

(National Key Laboratory of Automatic Target Recognition(ATR), National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Adequate IR data set are essential to design the algorithms of ballistic targets detection, trace and recognition. In traditional IR image stimulations, the systems often emphasize optical imaging research of some specific scenario in order to solve the related image processing problems involving targets detection and data association. But for target recognition, the required data stimulation model would place emphasis on the study of change rule of radiant power in all of the potential dynamic parameters. To satisfy the requirements of data simulation for target recognition, the research emphasis in this paper was put on the study of scenario parameters and radiant dynamic characteristics. Meanwhile, the underlying factors were analyzed for the aid to design the widely-used recognition algorithm.

Key words: data stimulation; target recognition; dynamic parameters

收稿日期: 2016-02-10; 修订日期: 2016-03-15

基金项目: 国家高技术研究发展计划

作者简介: 刘俊良(1988-), 男, 博士生, 主要从事光学成像自动目标识别方面的研究。Email: liujunliang_1988@163.com

导师简介: 卢焕章(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事实时信号处理、红外成像自动目标识别方面的研究。

Email: luhz@nudt.edu.cn

0 引言

弹道式目标的分类识别是弹道导弹防御的核心环节之一^[1],在识别算法的设计中,充足的红外辐射数据集是构建、训练及测试识别系统的基本条件。在数据获取的可行方案中,模拟仿真方法可以灵活设置环境、传感器及运动等参数,能够获得目标识别算法所需的各类场景数据,一直是研究目标识别算法中数据获取的主要途径^[2-3]。

国外对弹道目标红外数据的仿真研究相对成熟,已形成工业标准软件,但其技术鲜有发表^[3]。国内方面数据仿真研究得到了初步的探索,包括红外成像仿真^[3-4]、特定参数的场景仿真等^[5],其核心是利用红外成像系统对特定参数的目标场景进行图像仿真,解决目标成像高逼真度问题,用以目标检测、关联追踪等红外图像信息处理的研究。然而目标的识别研究要求获取所有可能动态参数下的目标辐射强度数据,由此对仿真模型提出了两点新要求:(1)注重对仿真动态参数的研究,使参数变化空间尽可能地符合实际情况;(2)强调对涉及辐射强度计算的相关参量进行动态变化特性深入的分析,以探索不同目标辐射强度信号的变化差异信息。

文中研究弹道目标识别设计所需要的数据仿真问题,在构建目标运动和辐射建模环节的过程中着重探讨了不同目标仿真参数的可能范围,并分析了各参量对辐射强度信号动态特性的影响;在此基础上合理地设置动态场景参数,获取具有代表性的目标红外场景数据;最后根据仿真结果分析了影响数据差异特性的底层因素,为构建适合任意仿真场景数据的目标识别算法提供了部分设计依据。

1 弹道目标建模

弹道目标识别的红外数据建模是指在可能的场景参数范围内模拟目标的运动、温度等参数的变化,计算入射目标辐射功率的过程。弹道导弹目标建模一般考虑目标运动模型和目标辐射模型两个方面。

1.1 目标姿态运动模型

为了实现精确定位和控制,弹头等目标通常快速自旋以保持运动稳定。由于这种自旋运动,弹头等目标在受到干扰力矩的作用下会绕着质心前进的方

向进动(如图 1(a)所示)。部分重诱饵一直与弹头伴飞,也会发生进动。但通常情况下弹头的稳定性更好,即自旋频率 ω_s 相对更高,进动旋转更加稳定。若这两者具有相同的进动频率 ω_p ,根据动量守恒定律可知弹头的进动角 θ_p 相对较小。轻诱饵、碎片等没有姿态控制装置,被抛出时受力不平衡而发生翻滚(如图 1(b)所示),通常情况下体积小的碎片转动惯量较小,其翻滚频率 ω_t 相对轻诱饵更高。

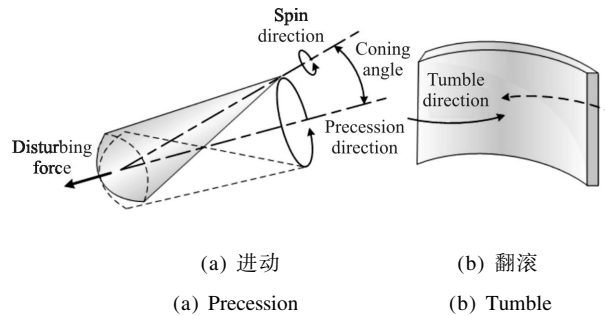


图 1 弹道目标的旋转运动示意图

Fig.1 Schematic of the rotation motion of ballistic target

不同于目标红外成像仿真建模中忽视目标旋转运动的处理方式^[6],文中仿真模型深入研究目标姿态运动规律,为了便于表述,建立目标运动坐标系 $O_i X_i Y_i Z_i$ 如下:以目标质心为原点 O_i ,以目标运动方向为 Z_i 轴的正方向,且为右手坐标系。假设目标表面某一点在初始时刻的 $O_i X_i Y_i Z_i$ 坐标为 M_1 ,该点经过目标姿态变化后的坐标值为 M_2 ,则 M_1 和 M_2 之间的坐标变换是由目标的姿态运动(分进动和翻滚两种情况)决定的,即

$$M_2 = R_{\text{pre}}(\omega_p, \theta_p) \cdot R_{\text{spin}}(\omega_s) \cdot M_1 \text{ or } M_2 = R_{\text{tumb}}(\omega_t) \cdot M_1 \quad (1)$$

在单位采样周期 Δt 内,目标进动矩阵 $R_{\text{pre}}(\omega_p, \theta_p)$ 是由旋转矩阵 $R_{X_i}(\theta_p)$ 和 $R_{Z_i}(\omega_p)$ 相乘实现的, $R_{X_i}(\theta_p)$ 表示以 $O_i X_i$ 为旋转轴、 θ_p 为旋转角度确定的旋转矩阵; $R_{Z_i}(\omega_p)$ 是指以 $O_i Z_i$ 为旋转轴、 $2\pi\omega_p\Delta t$ 为旋转角度确定的旋转矩阵。 $R_{\text{spin}}(\omega_s)$ 表示以 $O_i Z_i$ 为旋转轴、 $2\pi\omega_s\Delta t$ 为旋转角度确定的自旋矩阵。 $R_{\text{tumb}}(\omega_t)$ 表示以 $O_i Y_i$ 为旋转轴、 $2\pi\omega_t\Delta t$ 为旋转角度确定的翻滚矩阵。

弹道目标的姿态运动对红外辐射强度的影响主要体现在探测方向投影面积的变化上(即有效辐射面积)。例如进动旋转的弹道目标,其有效辐射面积可表示为:

$$A(t) = \bar{A} \cdot (1 + \alpha_1 f_1(2\pi\omega_p t + \theta_1) + \alpha_2 f_2(2\pi\omega_s t + \theta_2)) \quad (2)$$

式中： \bar{A} 为有效辐射面积变化的直流分量； $f_1(\cdot)$ 和 $f_2(\cdot)$ 分别表示由进动和自旋引起有效辐射面积的周期变化； α_1 和 α_2 为对应的幅值系数； θ_1 和 θ_2 为随机初始相位。

1.2 目标与探测器相对运动关系

大部分目标红外成像仿真模型中将目标视为点运动,以成像焦平面坐标系为参考系,通过坐标间的计算实现目标运动坐标系到参考系的转换^[3,5-7]。而弹道目标识别的数据仿真强调对目标辐射强度信号的精确计算,要求确定目标不同局部区域与探测器的相对关系,但是由于目标的姿态运动、探测方位实时调整等,使得计算更加复杂。

因此,为了直观理解和高效计算目标与探测器运动特性及相对关系,文中选取地心惯性(ECI)坐标系^[1]为参考坐标系,以此将目标运动坐标系和探测器运动坐标系关联起来(如图 2 所示),其中探测器运动坐标系定义为以透镜中心为原点 O_i , $O_i Z_i$ 为探测视线方向,符合右手规则。

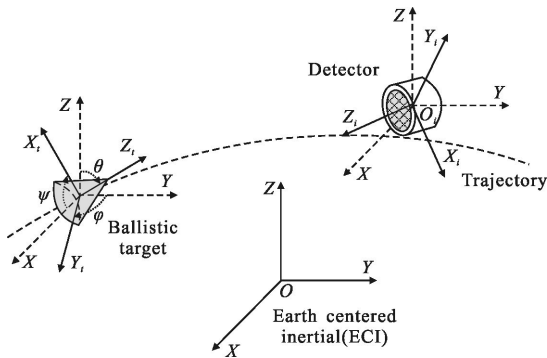


图 2 坐标系转化示意图

Fig.2 Schematic of coordinate transformation

目标运动坐标系到参考坐标系的转换为:

$$M=RM_i+T \quad (3)$$

式中： M 、 M_i 分别为目标在参考坐标系和目标运动坐标系下的坐标值； R 为坐标系间的旋转矩阵,采用欧拉法计算^[5],即将定点坐标系的旋转分解为绕 3 个坐标轴旋转的乘积 $R=R_x(\psi) \cdot R_y(\varphi) \cdot R_z(\theta)$ ； T 为平移向量。探测器运动坐标系与参考坐标系之间的转换关系与公式(3)类同,可用欧拉旋转矩阵来确定,由此将目标和探测器的位置、向量等信息都转换到 ECI 坐标系下表示,易于计算探测距离 $R(t)$ 、探测方位 $\Phi(t)$ 等影响目标辐射强度精确计算的参数值。

1.3 目标温度辐射模型

考虑到外空间环境比较单纯,目标与外界的热传递和热辐射关系简单易求,仿真采用节点热网络法计算弹道目标表面各点的实时温度,具体参照参考文献[6]。假定目标表面具有灰体辐射特性,且近似为漫反射体,则在波段 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 内入射的红外光谱辐射功率可模拟为:

$$P = \frac{\pi D^2}{4} \cdot \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda, T_*) d\lambda \cdot \frac{\varepsilon \tau A_*}{R_*^2} \cdot \Delta t \quad (4)$$

式中： ε 为目标的红外辐射率； τ 为光学系统的光谱透过率； D 为传感器入射孔径； Δt 为探测驻留时间； $L(\lambda, T_*)$ 为黑体的辐射亮度^[8], T_* 、 R_* 和 A_* 分别是公式(4)的 3 个基本变量:目标表面各点的实时温度值、探测距离、有效辐射面积,其中仅 A_* 是影响红外辐射数据周期变化的因素,将公式(2)代入上式则弹道目标的辐射功率 $P(t)$ 为:

$$P(t) \triangleq P_0(t) \cdot (1 + \alpha_1 f_1(2\pi\omega_p t + \theta_1) + \alpha_2 f_2(2\pi\omega_s t + \theta_2)) \quad (5)$$

式中： $P_0(t)$ 表示由探测距离缩短和温度场变化所引起的辐射强度变化的分量； $f_1(\cdot)$ 和 $f_2(\cdot)$ 影响着辐射数据的周期变化； α_1 和 α_2 决定了数据周期变化的幅度,弹道目标识别实际上就是根据 $P(t)$ 的不同模式及参数进行目标判决的过程。

在探测目标辐射强度的过程中不可避免地会引入干扰噪声,对目标识别特征的提取具有较大的影响,故对噪声建模是十分必要的。具体的系统噪声数据模型定义为^[9]:

$$\hat{I}(t) = [e_{cal}(r) + e_{white}(t)] \times [I(t) + e_{nei}(t)] \quad (6)$$

式中： $I(t)$ 为无噪声的目标红外仿真数据； $\hat{I}(t)$ 为含噪数据。式中涉及的噪声包括:(1)校准误差 $e_{cal}(r)$,探测传感器的位置误差函数,近似服从 $N(0, 0.01^2)$ ；(2)光电噪声误差 $e_{white}(t)$,为探测器焦平面的感光及光电转化过程中产生的误差,近似为高斯白噪声分布；(3)噪声等效辐射量 $e_{nei}(t)$,由传感器时域灵敏度和响应的非均匀性决定,可用等效噪声照度 NEFD 来表示。NEFD 定义为探测器单位孔径面积(cm^2)信噪比为 1 的入射红外功率大小^[8]。

2 弹道目标数据仿真

2.1 仿真场景与参数

仿真实验模拟利用探测器红外传感器对弹道目

标进行辐射强度测量的过程。仿真涉及一系列动态参数的设定,包括弹道目标进动频率、进动角、自旋频率等等,这些动态参数随场景的不同而变化。为简单起见,仿真中固定弹道目标和探测器的初始位置、速度等条件,通过改变姿态运动等参数模拟不同的场景,其中动态参数的选取符合建模部分中对参数可能采样区间的估计。

弹道目标的类型主要包括弹头、红外轻重诱饵和由舱体和发动机等分解成的弧形碎片,根据相关公开资料设计 4 种三维目标模型,如图 3 所示。其中弹头和重诱饵的垂直中轴偏离其内在惯性中轴约 0.5° (在制造工艺的误差限度内)^[2],由此可使弹头飞行中自旋。不失一般性,仿真中各类弹道目标的表壳采用相同密度的材料,轻重诱饵差异主要体现在表壳厚度的不同。

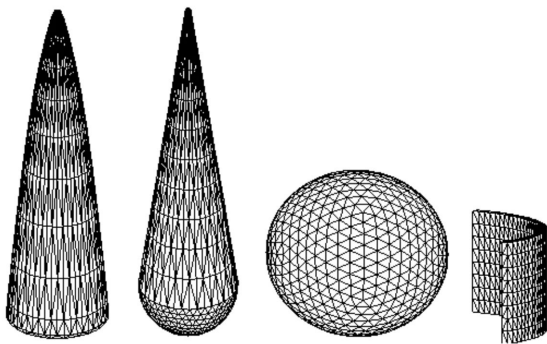


图 3 弹道目标三维网格模型(由左依次为平底锥体,球底锥体,椭球体,弧形碎片)

Fig.3 3D mesh models of ballistic targets (from left: flat-base cone, ball-base cone, spheroid and arc-shaped debris)

仿真中弹道目标的运动轨迹可根据初始条件由

椭圆弹道方程得到^[1],同时假设诱饵等干扰目标均在导弹系统分解的时候释放,获得瞬时初速度而随机扩散。设定弹头和探测器的初始运动条件(包括初始位置和初始速度)分别为:

$$\begin{cases} P_{\text{tar}}^0 = [0, 1.0 \times 10^5, 6.5 \times 10^6] \\ V_{\text{tar}}^0 = [0, -4.0 \times 10^3, 3.5 \times 10^2] \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} P_{\text{tar}}^0 = [1.0 \times 10^5, -1.0 \times 10^5, 6.5 \times 10^6] \\ V_{\text{tar}}^0 = [-2.1 \times 10^3, 2.1 \times 10^3, 6.9 \times 10^1] \end{cases}$$

则弹头目标和探测器的运动轨迹如图 4 所示。

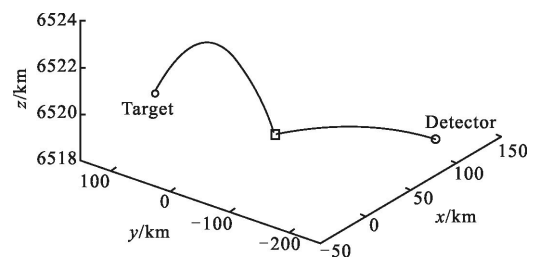


图 4 弹头与探测器的运动轨迹

Fig.4 Orbit motion of warhead and interceptor

诱饵目标的参数设定为:重诱饵与弹头具有同样的初始运动速度,且航迹一致;轻诱饵的抛出方向在导弹轨迹切线方向的 90° 立体角中随机分布,抛出速度在 $[3 \text{ m/s}, 6 \text{ m/s}]$ 之间均匀分布;碎片在分解后朝任意方向快速翻转,抛出速度在 $[10 \text{ m/s}, 20 \text{ m/s}]$ 均匀分布。实验设定探测器对弹头进行侧方位跟踪,探测波段为 $8.0 \sim 12.0 \mu\text{m}$,探测孔径为 13.8 cm 。仿真取 6 s 数据,由拦截前 50 s、40 s、30 s 开始记录,采样频率为 100 Hz,误差 e_{white} 服从 $N(0, 0.025^2)$,其他目标场景参数取值详见表 1。

表 1 弹道目标的仿真参数

Tab.1 Stimulation parameters of different ballistic targets

Target type	Warheads	Heavy decoys	Light decoys		Debris
3D model	Flat-base cone	Flat-base cone	Ball-base cone	Spheroid	arc-shaped debris
Size/m	Radius 0.15 Height 1.0	Radius 0.15 Height 1.0	Radius 0.135 Height 0.9	Long axis 0.4 Short axis 0.36	Arc length 0.12 Radius 0.05 Height 0.07
Case thickness/mm	4	4	0.6		4
Initial T/K	320	320	320		1500
Attitude motions	S.F. 2.0-3.0 Hz P.F. 0.4-0.6 Hz C.A. $3^\circ \sim 5^\circ$	S.F. 0.8-1.2 Hz P.F. 0.4-0.6 Hz C.A. $5^\circ \sim 9^\circ$	T.F. 0.2-0.3 Hz		T.F. 1.0-1.5 Hz
*Comments	S.F.=Spin frequency, P.F.=Precession frequency, C.A.=Coning Angle, T.F.=Tumble frequency				

2.2 数据仿真

由于篇幅的限制, 仅任取拦截前 30 s 的一组仿真场景数据进行显示, 如图 5 所示。

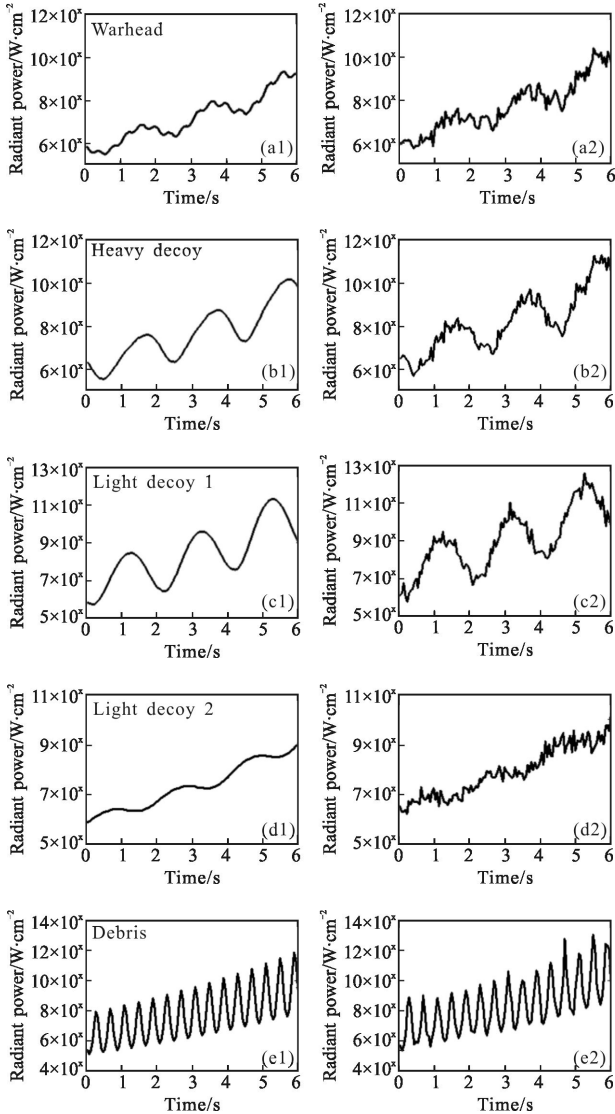


图 5 各类目标的红外辐射强度变化序列(左列为无噪数据, 右列为噪声数据), 其中弹头和重诱饵均设计为平底锥体, 场景参数分别为 2.5 Hz、0.5 Hz、3° 和 1.0 Hz、0.5 Hz、5°; 轻诱饵 1 和 2 模拟为球底锥体和椭球形状, 参数均为 0.5 Hz; 弧形碎片参数为 2.5 Hz

Fig.5 Infrared radiation power data of different targets(the noise-free and noisy one). Both warhead and heavy decoys are shaped flat-base cones, the parameters are 2.5 Hz, 0.5 Hz, 3° and 1.0 Hz, 0.5 Hz, 5° respectively; Light decoys are designed to ball-base cones and spheroids, both parameters are 0.5 Hz; The parameter of arc-shaped debris is 2.5 Hz

由图 5 可知, 所有红外辐射数据序列均呈现出

波动上升的趋势, 而且后期波动幅度略有增加, 同时不同目标数据也显示出较大的特性差异: (1) 弹头和重诱饵数据均呈现出不止一种频率特征, 且重诱饵数据序列的波动幅度略大于弹头的; (2) 两种轻诱饵数据均呈现单一频率特征, 球底锥体的轻诱饵数据序列波动幅度大于弹头和重诱饵的, 而椭球轻诱饵波动幅度却是所有目标中最小的; (3) 碎片数据快速周期波动, 且幅度远大于弹头和重诱饵的。由此得到如下推论: (1) 进动旋转的目标数据会呈现两种或两种以上的频率特征, 而翻滚运动的目标仅有一种频率特征; (2) 在确定姿态运动方式为进动旋转的前提下, 数据序列波动幅度的大小能够反映弹道目标的姿态稳定性。

3 弹道目标数据分析

该节旨在对仿真数据进一步分析, 分析不同目标数据的可区分性以支撑识别算法的研究。由 1.3 节知, 弹道目标表面温度场 T_s 、有效辐射面积 A_s 、探测距离 R_s 是辐射模型的 3 个核心要素。在这 3 个要素中, 温度场 T_s 、探测距离 R_s 无法为弹道目标识别提供可靠的分类特征依据, 主要原因: (1) 探测识别时间很短, 各类目标温度变化很小; 此外弹道目标的表面蒙皮可以通过采用特殊技术(例如隐身涂层等技术)来改变温度场计算的相关参数。(2) 在远距离探测下, 弹头、诱饵以及碎片等构成密集的目标群, 空间距离接近, 探测距离 R_s 基本相同。

有效辐射面积 A_s 与目标的几何结构、姿态运动等密切相关, 是影响红外数据序列周期波动的主要因素, 主要包括幅值系数 $\alpha_i (i=1, 2)$ 和波动频率 ω_p 、 ω_s 等参数。结合 2.2 节可推测, 幅值系数在一定程度上能够衡量弹道目标的姿态稳定性; 根据数据频率特征的个数可判断目标姿态运动的方式。

3.1 幅值系数 α_i 与姿态稳定性

为验证幅值系数 $\alpha_i (i=1, 2)$ 与目标姿态稳定性之间的关系, 实验分析了各类目标数据中 $\alpha(t)$ 的变化情况, 其中 $\alpha(t) = \alpha_1 \cdot f_1(2\pi\omega_p t + \theta_1) + \alpha_2 \cdot f_2(2\pi\omega_s t + \theta_2)$, 该参量可从目标有效投影面积变化曲线中提取出。实验中选取图 5 的弹头、重诱饵、椭圆轻诱饵和弧形碎片数据为研究对象, 绘制各类目标 $\alpha(t)$ 变化曲线如图 6 所示。其中碎片 $\alpha(t)$ 幅值变化最剧烈, 重诱饵次之且大于弹头的, 轻诱饵 $\alpha(t)$ 变化最小。

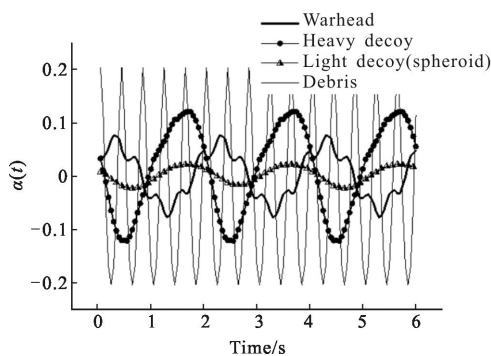


图 6 弹道目标 $\alpha(t)$ 时间序列曲线

Fig.6 Time series curves of midcourse targets $\alpha(t)$

进动目标的进动角越大表示对姿态运动稳定的控制越弱,故稳定性差的重诱饵相对弹头 $\alpha(t)$ 变化更大;翻滚的目标显然是姿态稳定性最差的,故弧形碎片 $\alpha(t)$ 波动最为剧烈,符合前面的推测。而轻诱饵之所以与推测相反,是由于椭球状的几何外形使其在探测方位下的投影面积变化较小,因而 $\alpha(t)$ 变化最小,因而辐射系数 $\alpha_i (i=1, 2)$ 仅在一定程度上可以衡量弹道目标运动中的姿态稳定性。

目前随着精确制导要求的提高,对弹头准确定位和精确控制的要求也越高,故需弹头在弹道上应保持极佳的姿态稳定性,而诱饵等目标难以与弹头相比,因而将目标的姿态稳定性参量作为识别弹头的特征信息是相对更为可靠的。

3.2 频率 ω_i 个数与姿态运动方式

3.1 节中提出用幅值系数 α_i 来估计目标姿态稳定性,但因无法区分目标的姿态运动方式,估计或有偏差。根据前文推测目标姿态运动方式不同能够使对应的红外仿真数据呈现不一样的频率特征个数,为此实验选取弹头和椭球状轻诱饵为研究对象验证数据频率特征个数与姿态运动方式的关系,其中数据频率特征个数可通过分析 $\alpha(t)$ 序列的频谱图方法获得。如图 7 所示,弹头的 $\alpha(t)$ 序列频谱图呈现出两

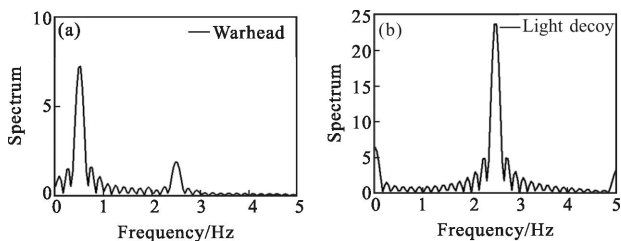


图 7 $\alpha(t)$ 序列曲线频谱图

Fig.7 Spectrogram of $\alpha(t)$

种频率特征 ω_p, ω_s , 轻诱饵仅呈现一种频率特征 ω_i , 由此验证了推论: 进动目标数据有两种明显频率特征,而翻滚目标仅有单一的数据频率特征。

综上分析可知: 幅值系数 α_i 和频率 ω_i 是影响不同目标数据差异特性的底层因子, 联合这两者可以有效分析目标的运动差异特性 (包括目标姿态运动方式和稳定性), 能够为目标识别提供可靠的分类依据。对幅值系数 α_i 和滚动频率 ω_i 参数的估计有很多方法, 例如借鉴成分分析方法提取出数据的周期振荡分量, 进而估算这些参数的值。

4 结论

文中开展了用于弹道目标识别的红外数据仿真研究, 在仿真建模环节中着重探讨了各类场景参数的可能取值范围, 并在分析计算辐射强度相关参量的动态变化特性基础上, 构建了目标红外数据的仿真模型。在仿真数据的分析过程中验证了数据底层因子幅值系数 α_i 和频率 ω_i 在一定程度上能够衡量目标姿态稳定性和判断姿态运动方式的推论, 为目标识别算法提供一种可行的设计思路。

参考文献:

- [1] Zhang Yi, Xiao Longxu, Wang Shunhong. Ballistic Missile Ballistics [M]. Changsha: National University of Defense Technology Press, 2005. (in Chinese)
张毅, 肖龙旭, 王顺宏. 弹道导弹弹道学 [M]. 长沙: 国防科学技术大学出版社, 2005.
- [2] Silberman Geoffrey L. Parametric classification techniques for theater ballistic missile defense [J]. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 1998, 19: 322-339.
- [3] Qiu Changzhen, Zhang Zhiyong, Lu Huanzhang, et al. Infrared modeling and imaging simulation of midcourse ballistic targets based on strap-down platform [J]. *Journal of Systems Engineering and Electronic*, 2014, 25(5): 776-785.
- [4] Liu Tao, Yang Degui, Jiang Weidong, et al. IR imaging modeling and simulation of ballistic target group outside atmosphere [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(4): 589-594. (in Chinese)
刘涛, 杨德贵, 姜卫东, 等. 大气层外弹道式目标群红外成像建模与仿真[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(4): 589-594.
- [5] Zhang Lu, Hu Xufeng, He Xinghua, et al. Stimulation of staring infrared scene on moving platform [J]. *Infrared and*

- Laser Engineering*, 2010, 39(2): 195–200. (in Chinese)
张路, 胡旭峰, 贺兴华, 等. 运动平台红外凝视场景的仿真[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(2): 195–200.
- [6] Li Yang, Zhao Fei, Zhang Zhiyong, et al. Infrared imaging simulation of taper target in the space [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 309–314. (in Chinese)
李阳, 赵菲, 张志勇, 等. 空间锥形目标的红外成像仿真[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(2): 309–314.
- [7] Lin Liangkui, Xie Kai, Xu Hui, et al. Research on infrared imaging simulation of midcourse ballistic object target complex [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2009, 28(3): 218–223. (in Chinese)
林两魁, 谢凯, 徐晖, 等. 中段弹道目标群的红外成像仿真研究[J]. 红外与毫米波学报, 2009, 28(3): 218–223.
- [8] Liu Shiquan. The Introduction of Ballistic Missile Defense Technology [M]. Beijing: China Astronautic Publishing House, 2003. (in Chinese)
刘石泉. 弹道导弹突防技术导论[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2003.
- [9] Cheryl Resch. Exo-atmospheric discrimination of thrust termination debris and missile segments [J]. *Johns Hopkins APL Technical Digest*, 1998, 19: 315–321.