

天基探测目标红外辐射建模与成像仿真

徐雨欣 曹运华

(西安电子科技大学 物理学院, 陕西 西安 710071)

摘要: 在当代军事领域中, 弹道导弹所处的战略位置显得尤为关键。鉴于此, 目标在飞行途中的追踪和识别显得至关重要, 目标红外辐射特性是关键识别依据。采用天基红外系统 (SBIRS) 作为检测装置, 提出一种空间目标红外属性的仿真分析技术。选择模拟弹道中段目标和诱饵作为研究焦点, 针对目标红外辐射特性进行仿真建模与计算。并基于此辐射模型, 对目标中段成像特征进行深空背景下的实时图像仿真, 从而总结出空间目标红外成像仿真的可靠方案。

关键词: 天基红外系统; 空间目标; 红外辐射特性; 成像仿真

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 1673-2219 (2024) 05-0013-06

DOI:10.16336/j.cnki.cn43-1459/z.2024.05.001

在军事和航天领域, 探测技术与目标的辐射特性分析都是研究的热点。目前及未来所规划的航天器主要是通过提取目标的光学特征来获取信息。经过数十年的发展和验证, 通过红外特征实现探测已经成为一种可靠而稳定的光学探测方法。由于传统实验成本高昂且周期长, 仿真成像技术则成为更理想的研究手段。天基红外系统 (SBIRS), 因其多功能性、高灵敏度、高精确性、全球性覆盖和高度集成化的特点, 已被视为未来空中目标探测的优选方案之一。国际上的红外成像仿真技术发展较早, 形成了成熟的实践体系。如: Hahn 通过提高计算效率优化仿真模型, 建立了基于商业软件的仿真架构^[1]; Macumber 等提出满足实时追踪的分层处理算法^[2]。国内研究者, 如: 刘涛等通过天基红外传感器完成目标面元红外辐射特征提取并实现大气层外目标群的动态仿真^[3]; 林两魁等则针对中段弹道目标群进行了天基低轨红外传感器成像仿真研究^[4]。

本文聚焦于天基红外系统下的目标成像仿真特征, 考虑到目标在空间的辐射属性, 可以建立目标的红外辐射模型, 通过仿真模拟技术计算其辐射量, 根据已有的理论知识^[5], 用仿真模拟量替换传统实验量, 从而生成红外辐射图像。

1 天基探测目标红外辐射特性仿真总体设计

1.1 红外成像仿真基本原理

在基于天基红外系统仿真成像的研究中, 针对探测系统与导弹目标的相对位置关系以及导弹的固有辐射特性, 构建了导弹目标的红外辐射模型。该模型综合考虑了导弹的自发辐射、太阳和地球等外部源在导弹表面产生的直接辐射与地球反射太阳的辐射, 如图 1 所示。

收稿日期: 2023-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (61875156)

作者简介: 徐雨欣 (1998-), 女, 陕西西安人, 硕士研究生, 研究方向为天基探测目标特性分析。通信作者: 曹运华 (1983-), 男, 安徽临泉人, 教授, 博士, 研究方向为复杂目标与环境光电特性。

通过考虑这些因素，建立了一个全面的导弹目标红外辐射模型。利用模拟计算方法，可以估计导弹目标的辐射强度。基于相似理论，这种模拟得到的辐射量可用于模拟真实探测器捕获的信号，从而进一步生成红外图像，为预警系统提供仿真支持。

1.2 仿真框架设计

本文在参考过往资料^[6]的基础上，基于天基红外系统低轨卫星探测平台对不同背景的辐射亮度进行计算以及对目标辐射场进行分析，结合背景、目标和红外探测器的相关信息^[7]，构建了一套用于天基探测弹道中段目标的成像仿真框架。整个成像的流程如图 2 所示。

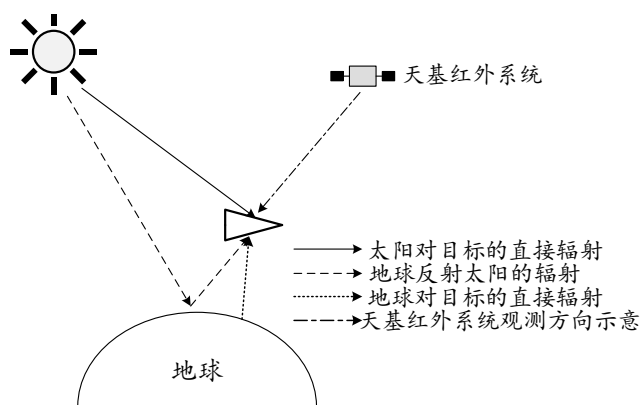


图 1 探测过程中目标接收到的辐射模型

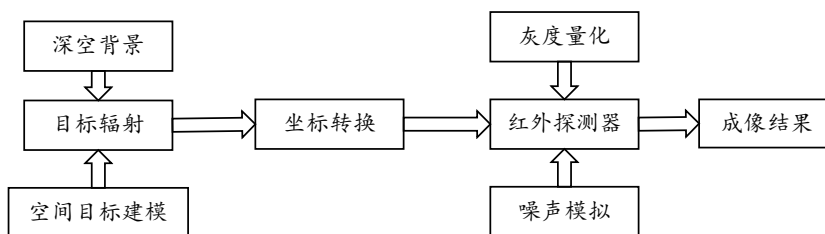


图 2 探测成像仿真流程图

在仿真程序中，首先会对目标的辐射信息和相应的背景辐射信息进行适当的处理，然后这些处理后的信息会传送到红外探测器模块。同时通过设置的目标飞行轨道获取某时刻目标的精确位置信息，在此基础上参考深空与恒星背景模型进行成像。在探测器模块中，在对接收到的信号进行处理的同时也会考虑探测器自身噪声对成像的潜在影响。经过这一系列的步骤，最终得到的是一个经过灰度量化处理的仿真图像。

2 天基探测目标红外辐射特性仿真建模

2.1 天基探测仿真场景建模

为精确评估天基探测任务中卫星性能与适用性，仿真场景建模及探测背景选择对探测系统效能和应用场景有重要影响。天基红外系统（SBIRS）由低轨卫星（LEO）、地球同步轨道卫星（GEO）、高椭圆轨道卫星（HEO）三部分组成。LEO 作为空间跟踪与监视系统（STSS）的一部分，位于约 1 600 km 轨道，通过独特设计与长波红外探测器实现小目标捕获与跟踪，本文主要模拟 LEO 卫星探测^[8]。GEO 位于约 35 400 km 轨道，用于识别大功率目标尾焰与其他红外事件，针对单个目标成像效果较差，不适用于本文讨论。HEO 轨道主要覆盖高纬度地区，本文同样不予讨论。图 3 为三种卫星轨道平台的架构示意图。

2.1.1 以地球为背景

在目标从主动段进入中段即目标离开大气层的这段过程中，通过天基红外系统对此阶段目标进行观测，因此时飞行高度较低，其观测模式以地球为背景，如图 4 所示。

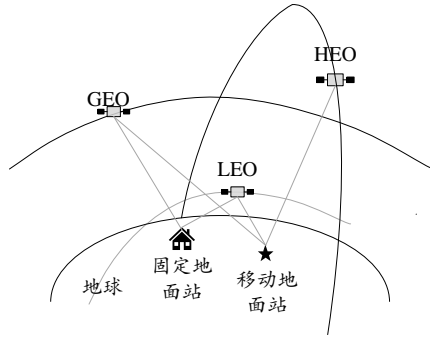


图3 天基红外系统 (SBIRS) 卫星平台架构示意图

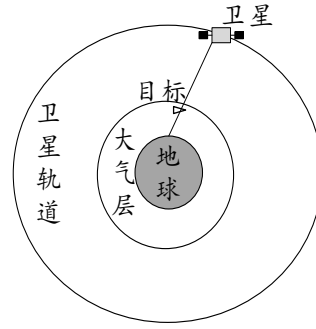


图4 地球背景下目标探测示意图

2.1.2 以深空为背景

在目标完全进入中段后,天基红外系统对此阶段目标进行观测,其观测视角逐渐改变。当目标达到一定高度时,此时的观测模式将以深空为背景,如图5所示。

考虑到目标飞行高度与传感器视场限制问题,对于本文仿真对象弹道中段目标来说,在其中段飞行过程中以地球为背景的观测成像模式不能很好地对整个中段过程进行观测。因此主要考虑将宇宙深空和恒星组成的深空作为弹头目标仿真成像的背景。在宇宙环境下,恒星呈现出相对稳定的位置与红外辐射特性,为红外成像提供了一个有利的背景环境。

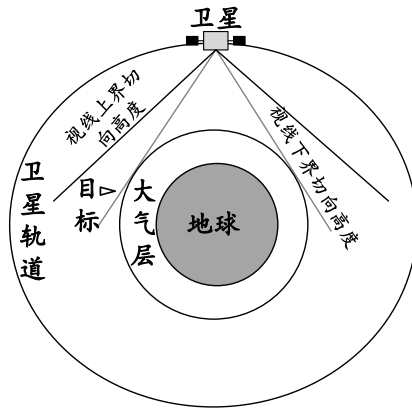


图5 深空背景下目标探测示意图

2.2 背景辐射热流特性建模

在分析弹道中段目标所处的空间环境时,目标受到太阳和地球共同作用的辐射影响。太阳和地球辐射以特定的入射角作用于弹道中段目标表面,因此必须对这些辐射源在目标表面产生的辐照度进行精确建模计算。考虑目标自身材料结构特性与理论公式,建立有关温度分布的数学方程,求解方程组就可以得到目标的温度场^[9],再根据目标的材料特性与温度特性相关公式即可得到目标在不同波段的红外辐射场。

2.2.1 太阳辐射

仿真需要把目标划分为多个面元,设面元数为 N ,第 i ($i=1,2,\dots,N$) 个面元也称为节点 i ,节点 i 接收到的太阳辐射能量为 Q_{1i} ,其表达式可以写为

$$Q_{1i} = G_0 A_i F_{s,i} \alpha_{s,i} \quad (1)$$

式中: G_0 表示太阳常数,本文 $G_0=1\ 367\ \text{W/m}^2$; A_i 表示节点 i 的面积; $F_{s,i}$ 表示的是节点 i 对太阳辐射的角系数; $\alpha_{s,i}$ 是节点 i 对太阳辐射的吸收率。

2.2.2 地球辐射

节点 i 接收到的地球辐射能量为 Q_{2i} ,其表达式为

$$Q_{2i} = E_{\text{earth}} A_i F_{e,i} \alpha_{e,i} \quad (2)$$

式中: $E_{\text{earth}}=237\ \text{W/m}^2$,是地球总辐照度; $F_{e,i}$ 表示的是节点 i 对地球辐射的角系数; $\alpha_{e,i}$ 是节点 i 对地球辐射的吸收率。

2.2.3 地球反射太阳辐射

地球反射太阳辐射也称为太阳间接辐射,由太阳照射到地球再由地球反射至目标。节点 i 接收到

的地球反射太阳辐射的能量 Q_{3i} 表达式为

$$Q_{3i} = G_0 \rho_{se} A_i F_{se,i} \alpha_{s,i} \quad (3)$$

式中: ρ_{se} 表示的是地球平均发射率, 取为定值 0.3; $F_{se,i}$ 表示的是节点 i 接收经过地球系统反射后的太阳辐射的角系数。

2.3 目标辐射特性建模

2.3.1 目标向外辐射

由斯特藩-玻尔兹曼定律可以求得节点 i 向外发生辐射造成的内能损失 Q_{4i} 为

$$Q_{4i} = \varepsilon \sigma T_i^4(t) A_i \quad (4)$$

式中: ε 是节点 i 的材料发射率; $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$, 是斯特藩-玻尔兹曼常量; $T_i(t)$ 表示的是节点 i 在 t 时刻所对应的温度。

2.3.2 内能增加量

某时刻节点 i 的内能增加量 Q_{5i} 可以表示为

$$Q_{5i} = \rho_i c_i V_i \frac{dT_i(t)}{dt} \quad (5)$$

式中: ρ_i 表示节点 i 的材料密度; c_i 表示节点 i 的材料比热容; V_i 表示节点 i 的体积。根据辐射传输与光照计算理论, 结合弹道中段目标的辐射特征计算模型, 弹道中段目标的热网络方程可表示为

$$Q_{1i} + Q_{2i} + Q_{3i} - Q_{4i} = Q_{5i} \quad (6)$$

在表面初始温度、空间位置与其他计算所需参数已知的情况下, 可以通过求解热网络方程来获得表面温度场变化情况与规律。

2.4 目标成像特征

综合之前的讨论, 可以通过图 6 描述天基红外系统对弹道中段目标的成像特性。

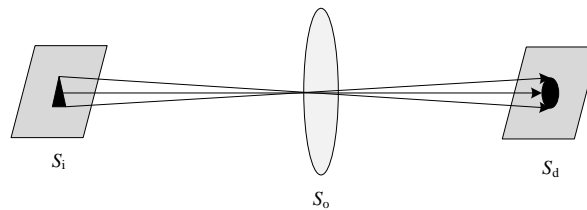


图 6 天基观测系统对目标成像示意图

图 6 中: S_i 为目标辐射源面积; S_o 为入瞳面积; S_d 为卫星搭载探测器的像元面积。在弹道中段目标成像中, 天基红外传感器将三维目标映射至二维焦平面。通过其成像原理和内部结构, 场景辐射信号在光学系统、探测单元和电子处理模块等组件中进行连续传输和转换。红外成像系统的实时性还受时间和空间位置因素影响: 仿真时间变化影响大气条件以改变热辐射特性、红外接收器与目标间相对位置差异导致大气衰减和辐射路径效应差异。因此, 为确保红外场景仿真的实时性, 纹理采样与像素混合处理成为必要手段^[10]。

在探测器的成像过程中, 仪器噪声是不可忽略的因素, 系统内部的电路配置和外部环境带来的干扰均可能成为噪声的来源^[11]。这些噪声最终在输出图像中体现为无规律白色或黑色散点。本文采用高斯噪声来模拟红外仿真图像中的随机噪声现象, 其概率密度函数可以通过以下公式来描述:

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left[-\frac{(x-M)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (7)$$

式中: M 表示噪声 x 的平均电平, σ 表示标准偏差。

3 基于天基红外系统的目标仿真成像结果与分析

3.1 实时仿真结果

进行目标分析时,首要步骤是为目标构建精确的数学模型。为了保证计算的精度,会在已建模的目标表面进行三角面元剖分,确保每个分区足够细致以满足所需的计算精度标准。本文重点探讨了三种特定的目标几何形态:圆锥形目标、钝头锥形目标、球形目标,如图7所示:

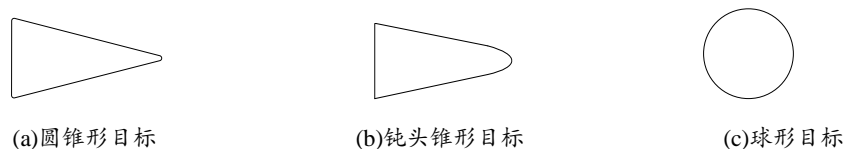


图7 三种目标模型示意图

初始温度设置为 300°C ,目标自旋速度为 1 rad/s ,目标表壳厚度为 0.001 m ,密度为 1700 kg/m^3 ,目标表面对太阳辐射的吸收率为 0.25 ,目标表面对地球辐射的吸收率为 0.85 ,表面材料发射率为 0.85 。全程以 5 s 为一个时间节点,选取其中四个时间节点为例,计算时间 t 分别在第 1 s 、第 30 s 、第 500 s 、第 2000 s 的温度辐射数据并进行仿真成像,覆盖目标的全飞行周期。圆锥形目标、钝头锥形目标、球形目标的红外成像仿真结果分别如图8、图9、图10所示。

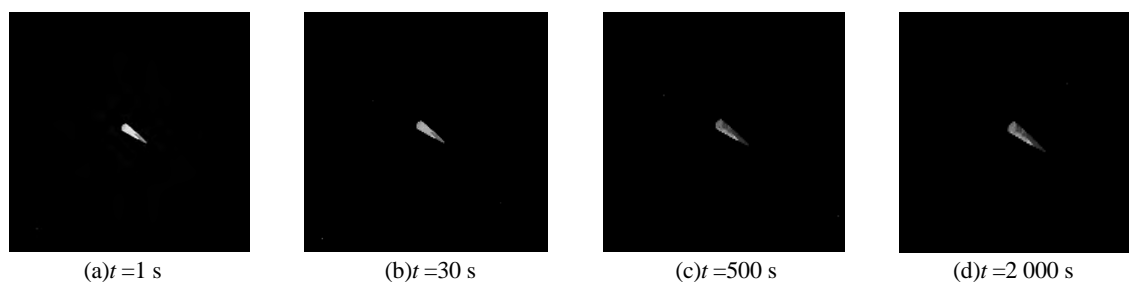


图8 圆锥形目标红外成像仿真结果

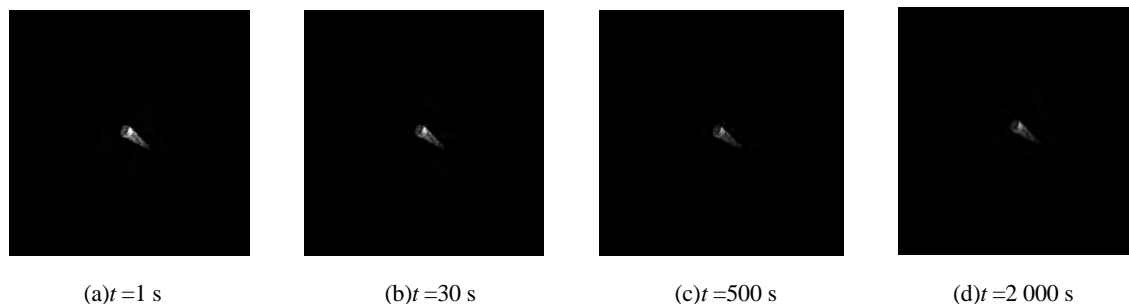


图9 钝头锥形目标红外成像仿真结果

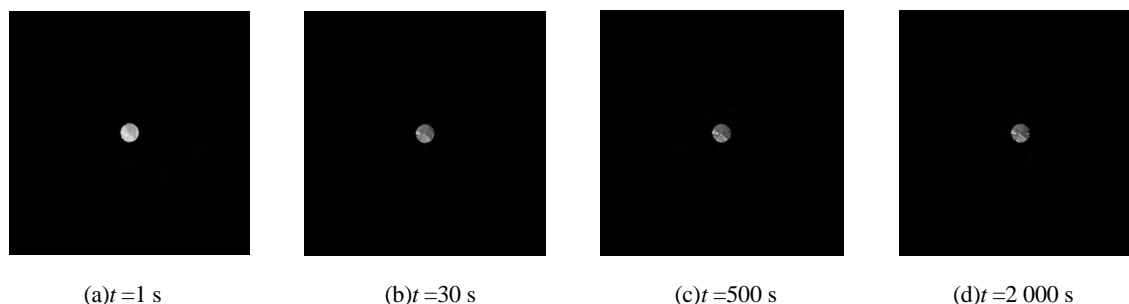


图10 球形目标红外成像仿真结果

3.2 仿真结果分析

由于宇宙空间的辐射属性相对单一,其深空背景的温度异常低,且太空中的辐射传递基本不受外

界干扰, 以及目标的主动段热效应, 所以能得到较高亮度的目标仿真结果。这两者结合为目标仿真成像提供了卓越的条件。

由图 8、图 9、图 10 可知: 弹道中段目标在红外仿真成像中通常位于探测器视场中央, 以点源形式出现, 其红外辐射能量主要集中在视场中心的像素区域上。红外成像效果的差异主要体现在两个方面: 一是弹头目标像点亮度的差异, 二是不同波段下空间背景天体在成像上的表现不同。

由于主动段的燃料燃烧与热效应导致目标进入中段后初始温度较高, 所以辐射亮度较高。随着助推与主动段热效应停止, 目标温度快速下降, 辐射亮度也随之降低, 在目标进入中段运动初期尤为明显。可以看到在三类目标第 1 s 与第 30 s 的仿真图像中亮度有差异, 而后续的温度变化比初期小, 随着时间增加亮度也逐渐减小但差距不大。因此, 对目标进行探测时应尽量选取深空背景及目标刚进入中段的时间, 此时背景对目标成像的干扰能很大程度降低。结合多平台、多视角、多波段的观测方式可以获取关于目标群的更丰富的红外辐射特性与空间位置信息, 能够更好地对目标的形状、飞行姿态等信息进行分析。

4 结束语

本文从弹道中段目标探测角度出发, 基于低轨卫星 (LEO) 天基探测平台对弹道中段目标进行红外仿真成像, 结合红外成像理论形成完整的成像链路架构, 综合考虑了目标在中段接收到的复杂环境辐射源以及目标自身的辐射特性, 进行了深入的物理量化建模。进一步考虑了天基探测弹道中段目标红外仿真成像的多种实际影响因素, 包括卫星轨道参数、探测器噪声效应等, 确保了仿真场景的真实性和准确性。最终仿真得到了三类目标运动过程中不同时刻辐射特性的红外图像。更远距离和更复杂背景下的探测任务将是下一步的研究方向。

参考文献:

- [1]HAHN V. Characterization and assessment of COTS software utilization for infrared signature modeling in weapon system simulation validation[C]//Targets and Backgrounds XI: Characterization and Representation. Orlando, Florida, USA. SPIE, 2005, 5811: 240-247.
- [2]MACUMBER D, GADALETA S, FLOYD A, et al. Hierarchical closely spaced object (CSO) resolution for IR sensor surveillance[C]// Signal and Data Processing of Small Targets 2005. San Diego, California, USA. SPIE, 2005, 5913: 591304-1-591304-15.
- [3]刘涛, 陈浩文, 黎湘. 天基红外传感器弹道导弹中段目标识别技术分析[J]. 电光与控制, 2009, 16(3): 6-8,36.
- [4]林两魁, 谢恺, 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.
- [5]黄曦. 高真实感红外场景实时仿真技术研究[D]. 西安:西安电子科技大学, 2014.
- [6]于秉志, 卢焕章, 陶华敏, 等. 引入探测器特性的空间目标红外灰度序列仿真研究[J]. 激光与红外, 2021, 51(8): 1018-1024.
- [7]戴桦宇, 张雅声, 周海俊, 等. 基于 STK/EOIR 的弹道目标中段红外成像仿真研究[J]. 电光与控制, 2018, 25(1):1-5.
- [8]朴美兰, 李斯戎, 齐艳丽, 等. 美国天基低轨预警系统发展分析[J]. 国际太空, 2022(6):40-45.
- [9]袁航, 王晓蕊, 张凯莉, 等. 复杂环境下弹道中段目标探测能力分析[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(6):302-311.
- [10]孙云, 李晓燕, 李敏. GPU 结合 OGRE 技术在红外场景仿真中的应用研究[J]. 系统仿真学报, 2013, 25(8):1935-1939.
- [11]唐麟, 刘琳, 苏君红. 红外图像噪声建模及仿真研究[J]. 红外技术, 2014, 36(7):542-548.

(责任编辑: 宫彦军)