

文章编号: 1672-8785(2017)02-0021-05

基于 STK/EOIR 的弹道中段 目标红外辐射特性研究

周海俊¹ 李 智² 李学军³

(1. 装备学院研究生管理大队, 北京 101416 ;

2. 装备学院航天指挥系, 北京 101416 ;

3. 装备学院信息装备系, 北京 101416)

摘 要: 提出了一种天基预警系统对弹道中段目标红外探测的仿真方法。利用卫星工具箱的红外模块 (Satellite Tool Kit/Electro-Optical Infrared Sensor, STK/EOIR) 对中段目标红外辐射的特性进行了研究。首先, 提出了基于 STK/EOIR 的弹道中段目标动态红外辐射特性仿真方法, 分析了 EOIR 目标红外辐射的计算模型和传感器接收模型。然后, 给出了典型目标在中波、中长波以及长波红外波段的红外辐照度的仿真结果。最后, 对比分析了观测角、观测距离对天基凝视传感器接收目标红外辐照度的影响。仿真结果表明, 中段目标红外辐射的强度能满足天基凝视传感器的探测灵敏度要求。

关键词: 中段目标; 天基探测; 红外辐射; 辐照度

中图分类号: TN215 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2017.02.004

Study of Infrared Radiation Characteristics of Midcourse Ballistic Targets Based on STK/EOIR

ZHOU Hai-jun¹, LI Zhi², LI Xue-jun¹

(1. Department of Graduate Management, Equipment Academy, Beijing 101416, China;

2. Department of Space Command, Equipment Academy, Beijing 101416, China;

3. Department of Information Equipment, Equipment Academy, Beijing 101416, China)

Abstract: A simulation method of infrared (IR) detection of midcourse ballistic targets by spaceborne early warning systems is proposed. The IR radiation characteristics of midcourse targets are studied by using the infrared module of Satellite Tool Kit/Electro-Optical Infrared Sensor (STK/EOIR). First, the simulation method of dynamic IR radiation characteristics of midcourse ballistic targets based on STK/EOIR is proposed. The calculation model of IR radiation of EOIR targets and the receiving model of the sensor are analyzed. Then, the simulation results of IR irradiation of a typical target in mid-infrared waveband, mid and long infrared waveband and long infrared waveband are given. Finally, the influences of observation angle and observation range on the target IR irradiation received by spaceborne staring sensors are compared. The simulation results show that the IR radiation intensity of midcourse ballistic targets can meet the detection sensitivity requirements of spaceborne staring sensors.

Key words: midcourse target; space detection; infrared radiation; spectral irradiance

收稿日期: 2016-11-22

基金项目: 国家 863 资助课题

作者简介: 周海俊 (1987-), 男, 江西上饶人, 博士研究生, 主要研究方向为空间信息获取与处理。

E-mail: Zhouhj_002@126.com

0 引言

目标的红外辐射是天基预警系统探测弹道中段目标信息的关键和基础,在目标检测、跟踪以及识别中具有重要的意义。国内外针对中段目标的红外辐射特性开展了较多的研究^[1-6],其中数值仿真计算是一种重要的研究手段^[7-11]。目前的研究虽然已取得了一些有意义的成果,但在仿真计算中所考虑的因素以及模型精度等方面还比较有限。

本文提出一种基于 STK/EOIR 模块的中段目标动态红外辐射特性仿真方法,通过综合利用 STK 高精度姿轨运动模型与 EOIR 红外辐射模型开展天基凝视传感器对中段目标红外辐射的探测仿真,得到不同观测平台下中段目标的动态红外辐射信息。结果可为天基预警探测、目标检测与识别提供较精确的目标红外辐射数据支持。

1 基于 EOIR 的仿真构建方法

利用 STK/EOIR 对目标、背景环境的光电/红外辐射特性建模,能为地球科学、弹道防御和空间态势感知等领域提供光电及红外传感器的探测、跟踪和成像性能的仿真。本文提出的天基凝视传感器对中段目标红外辐射探测的数值模拟计算流程如图 1 所示。

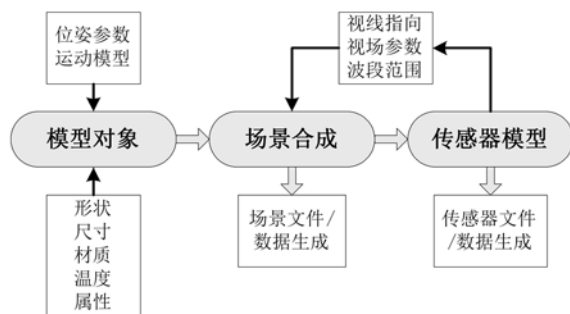


图 1 基于 EOIR 的目标红外辐射探测计算流程

EOIR 通过自定义目标对象,在场景合成中对目标的红外辐射特性进行建模,然后通过传感器接收,获得目标的红外辐射探测数据。在模型对象中,可以自定义目标的形状、尺寸、材质和温度等与红外辐射相关的参数,并且可以通

过 STK 提供目标与观测平台的高精度姿轨运动模型。在场景合成中,EOIR 考虑了包括天体和空间环境在内的背景辐射模型,能够对目标在背景中的红外辐射进行合成场景建模。在传感器模型中,可以定义传感器视场、探测波段和噪声等参数,最后生成传感器对中段目标的红外辐射探测数据。

2 STK/EOIR 目标红外辐射探测模型分析

2.1 目标表面面元分割

STK/EOIR 根据目标的几何模型,将目标表面分割成面积近似相同的面元,每个面元只包含一种材质,同一个面元内的温度相同。根据目标的位置、姿态以及面元在目标父体中的位置,通过计算可得到面元法向。

2.2 面元红外辐射计算模型分析

在中段探测环境下,不考虑大气传输衰减效应,面元 dA 的红外辐射为面元反射辐射 $L_{i,f}$ 和面元自身辐射 $L_{i,\lambda}$ 之和:

$$L_{\lambda} = L_{i,\lambda} + L_{i,f} \quad (1)$$

(1) 面元自身辐射模型

面元自身辐射 $L_{i,\lambda}$ 与面元表面材质发射率 ε_{λ} 、面元有效温度 T 有关:

$$L_{i,\lambda} = \varepsilon_{\lambda} \cdot \frac{2hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1} \quad (2)$$

式中, ε_{λ} 为面元在波长为 λ 时的发射率; $h=6.6 \times 10^{-34}$ J·s 为普朗克常量; $k=1.38 \times 10^{-23}$ J/K 为玻耳兹曼常量; $c=3 \times 10^8$ m/s 为光速; T 为面元的表面温度。

(2) 面元反射辐射模型

面元反射辐射是指来自其他对象的红外辐射入射到面元上后由面元反射的红外辐射。面元反射辐射的计算模型为^[12]

$$L_{i,\lambda} = \left[\sum_{i=src} (E_{\lambda}(i) \cdot (\hat{I}(i) \cdot \hat{N}) \cdot F) + E_{\lambda}^{bkg} / \pi \right] \cdot \rho_{\lambda} \quad (3)$$

式中, ρ_{λ} 为面元表面在红外波长 λ 处的反射率; $(\hat{I}(i) \cdot \hat{N})$ 为入射辐射的方向余弦; F 为双向反射分布函数; E_{λ}^{bkg} 是背景光谱,包括地球自身的红外辐射、地球反照的太阳光辐射、黄道

光 (位于日地间尘埃微粒的反射光) 和大气光晕等空间背景环境辐射。

$E_{\lambda}(i)$ 是来自第 i 个辐射源的红外入射辐射 (包括太阳辐射、天体和其他面元反射的太阳光辐射)。其中, 太阳辐射的计算模型为

$$E_{\lambda}^{sun} = L_{\lambda}^{tab} d\Omega^{sun} \quad (4)$$

式中, L_{λ}^{tab} 是太阳光谱辐射表 (ASTM-490); Ω^{sun} 是太阳相对面元 dA 的投影立体角。其他天体也近似处理为点源辐射, 综合考虑其自身辐射以及反射的太阳辐射, 计算模型为

$$E_{\lambda}^{other} = [E_{\lambda}^{sun} \cdot \rho_{\lambda} \cdot \frac{2}{3\pi} \cdot P_{\psi} + \varepsilon_{\lambda} B_{\lambda}(T)] \cdot d\Omega^{other} \quad (5)$$

式中, P_{ψ} 是相位函数; Ω^{other} 为辐射源相对面元 dA 的投影立体角。

来自目标自身其他面元辐射入射的计算模型为

$$E_{\lambda}(i) = \sum_{tess=k} [[\sum_{src=j} E_{\lambda}(j) \cdot (\hat{I}(j) \cdot \hat{N}(k)) \cdot F(\hat{I}(j), \hat{N}(k), \hat{O})) + E_{\lambda}^{bg} / \pi] \cdot \rho_{\lambda}(k) + \varepsilon_{\lambda} B_{\lambda}(T(k))] \cdot d\Omega(k) \quad (6)$$

式中, \sum_{tess} 为可照射到面元 dA 上的所有面元辐射源; \sum_{src} 为可照射到面元 k 的所有辐射源; $(\hat{I}(j) \cdot \hat{N}(k))$ 为面元 k 辐射入射的方向余弦。

2.3 传感器接收目标红外辐射模型

传感器入瞳处接收的目标辐照度不仅与观测目标的辐照度有关, 还与探测距离 R 、大气传输效应、目标—探测器法线夹角以及探测器视场大小等有关。探测器入瞳处接收的目标红外辐射辐照度为目标每个面元辐射照度之和, 其计算公式为

$$E_{\lambda_1, \lambda_2} = \sum_{i=1}^N S_i F_{d,i} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda} d\lambda \quad (7)$$

式中, N 为面元的数量; S_i 为面元 dA 的面积; $\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{\lambda} d\lambda$ 为面元 dA 在红外波段 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 范围内的辐射通量; $F_{d,i}$ 为面元 dA 与探测器入瞳面的角系数, 具体可参见文献 [13]。

由上述分析可知, 基于 EOIR 的中段目标红外辐射特性仿真模型能够较好地模拟天基凝视传感器对中段目标红外辐射的探测。这主要体现在 2 个方面: 一是借助 STK 内嵌的空间目标姿轨运动模型, 能够实时模拟目标和观测平台的高精度位姿运动状态; 二是在目标面元反射辐射模型中, 尤其是在空间背景环境建模上, 考虑了包括天体、大气和尘埃微粒等更多影响空间背景红外辐射的因素, 提高了天基凝视传感器对中段目标红外辐射探测仿真模拟的保真性。

3 仿真实验与结果分析

3.1 仿真参数设置

场景时间为 2016 年 7 月 16 日的 00:02:06 至 00:06:06, 仿真步长为 1 s。在此场景下, 弹体目标处于阳光照射下, 传感器器有较好的观测视场。相关参数说明如下:

(1) 目标材质。目标采用圆锥和圆柱体组合构型; 弹头圆锥长 4 m, 底面半径为 0.5 m, 表面的涂层材料为铝箔 (Aluminum MLI), 温度为 300 K。圆柱弹体高 4 m, 底面半径为 0.5 m, 表面的涂层材料为白色热控材料 (White Thermal Control), 温度为 300 K。

(2) 目标弹道参数。仿真时采用一条标准弹道, 发射点为 (76.48° E, 45.10° N), 落点为 (108.74° E, 54.48° N); 目标姿态运动的参数是, 自旋频率为 20 圈/min, 进动角为 5°, 进动频率 3 圈/min, 章动角为 1°。

(3) 观测平台的轨道参数。观测平台 1 的轨道参数是, 半长轴 $a=7978.14$ km, 倾角 $i=58^\circ$, 升交点赤经 $\Omega=25^\circ$, 真近点幅角 $f=50^\circ$ 。观测平台 2 升交点赤经取 $\Omega=295^\circ$, 其他参数与平台 1 相同。

(4) 传感器参数。凝视传感器参数采用美国“中段空间实验” (Midcourse Space Experiment, MSX) 卫星中空间成像望远镜 SPIRIT III 的红外成像辐射计的参数。设置传感器的部分参数: 视场角为 $1^\circ \times 1^\circ$, 瞬时视场为 $90 \mu\text{rad} \times 90 \mu\text{rad}$, 红外谱段和探测器参数见表 1。

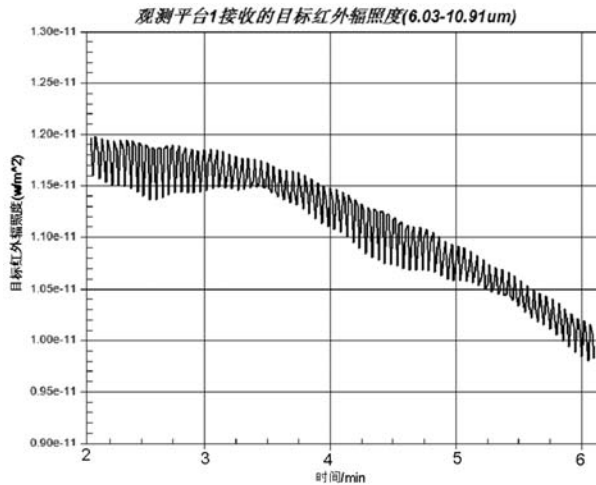
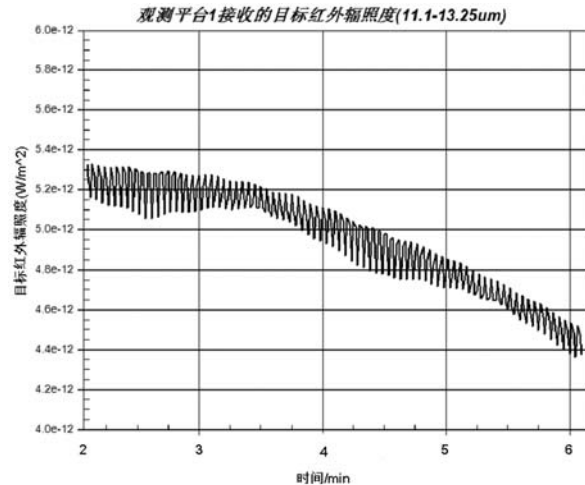
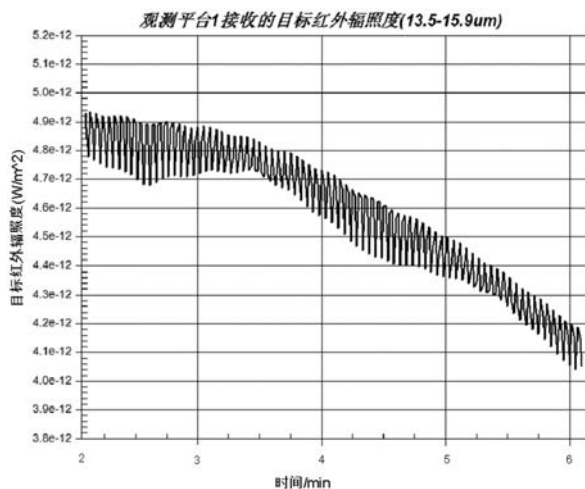
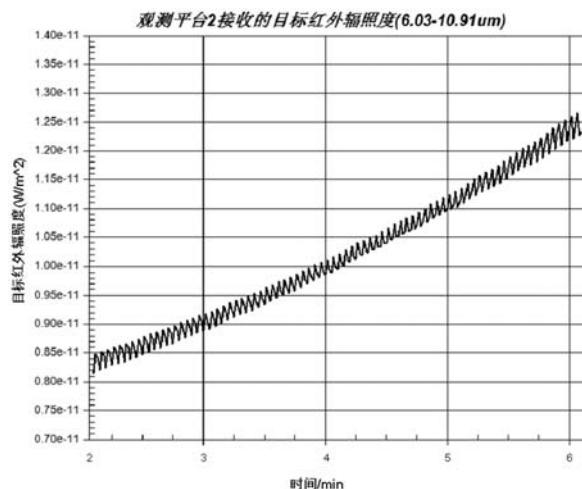
表1 凝视探测器红外谱段的参数设置

谱段编号	光谱范围/ μm	焦平面阵列	噪声等效流量密度/ $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$
A	6.03~10.91	192×192	6.0×10^{-19}
C	11.1~13.24	192×192	1.6×10^{-18}
D	13.5~15.9	192×192	2.0×10^{-18}

3.2 仿真结果分析

图2~图4为观测平台1接收的目标红外辐照度的曲线。从图中可以看出,辐照度变化呈现长期变化、长周期以及短周期变化的特点。经分析可知,长期变化趋势主要是由观测距离的变化导致的。周期性变化的原因是,目标的自旋和

进动使观测方向上的目标有效辐射面积发生周期性变化,其中,短周期变化主要是由目标自旋运动引起的。从图中还可以发现,目标红外辐照度曲线的变化周期可以反映目标的姿态运动状态,曲线的变化幅度可以反映目标有效辐射面积的变化。

图2 观测平台1获取的目标红外辐照度(6.03~10.91 μm)图3 观测平台1获取的目标红外辐照度(11.1~13.25 μm)图4 观测平台1获取的目标红外辐照度(13.5~15.9 μm)图5 观测平台2获取的目标红外辐照度(6.03~10.91 μm)

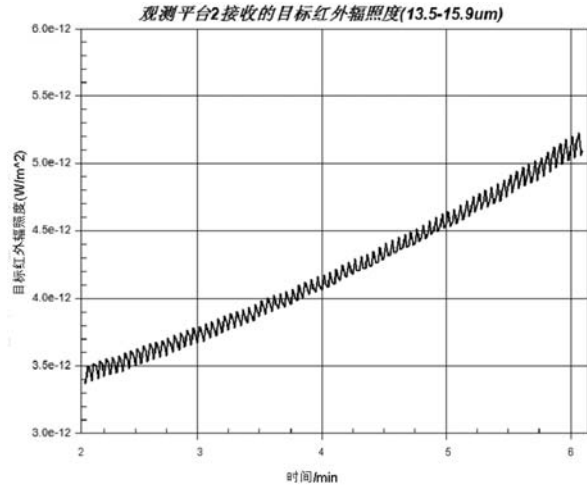
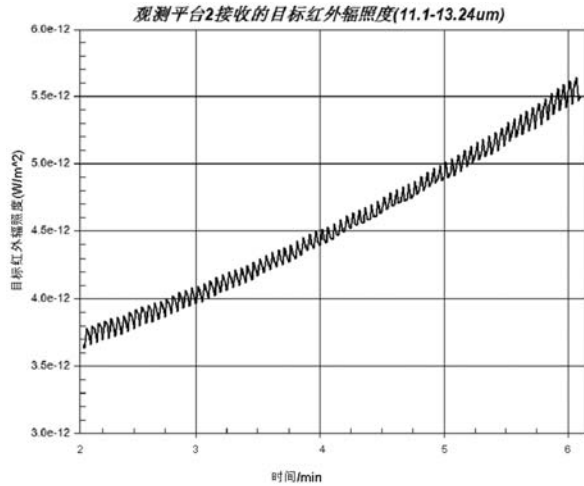


图 6 观测平台 2 获取的目标红外辐照度 (11.1~13.25 μm) 图 7 观测平台 2 获取的目标红外辐照度 (13.5~15.9 μm)

为进一步说明目标红外辐照度曲线的变化特性,引入观测平台 2 的探测数据予以对比分析。图 5~图 7 为观测平台 2 获取的目标红外辐照度曲线。经对比可知,在同一个波段范围内,由于观测距离与观测角度的差异,2 个平台获取的目标辐照度曲线存在较大差异。其中,辐照度曲线周期性变化的差异主要是由平台观测视线角的变化引起的,而曲线变化趋势的差异主要是由观测距离的变化引起的。

综合图 3~图 7 可以发现,传感器在红外波段范围内接收的目标红外辐照度随波长的增大呈现递减趋势,即 $E_{6.03\sim 10.91} > E_{11.1\sim 13.25} > E_{13.5\sim 15.9}$,且在 $6.03\sim 10.91 \mu\text{m}$ 范围内的目标辐照度比 $11.1\sim 13.25 \mu\text{m}$ 、 $13.5\sim 15.9 \mu\text{m}$ 波段的大得多,表明探测器接收的目标红外辐射主要集中在中波红外范围内。另外,从图中可看出,传感器接收的目标红外辐照度在 10^{-12} 量级以上,而传感器在中波、长波范围内的噪声等效流量密度 (Noise Equivalent Flux Density, NEFD) 最大处于 10^{-18} 量级 (见表 1),从而可知目标在中长波红外波段的辐射强度满足传感器探测的灵敏度要求,表明天基凝视探测器可用于探测中段目标的红外辐射。

4 结论

提出了基于 STK/EOIR 的中段目标动态红外辐射特性仿真方法,充分利用 STK 内嵌的空间目标高精度姿轨运动模型,结合目标、背景的

红外辐射特性,综合考虑传感器、目标和环境之间的相互作用,实现了天基凝视传感器对中段目标动态红外辐射特性的仿真。仿真得到了以下结论:观测视角与观测距离是影响天基凝视传感器接收中段目标红外辐照度变化的重要因素;在中波、中长波范围内,天基凝视传感器可以对中段目标实施有效探测,目标的红外辐射强度可以满足天基探测的灵敏度要求。

参考文献

- [1] 丰松江, 聂万胜. 中段弹道导弹和背景红外辐射特性研究概况 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(11): 19-22.
- [2] 呼玮, 杨建军, 王森, 等. 弹道导弹中段红外辐射特性数学建模与仿真 [J]. 光电子技术, 2009, 29(4): 240-243.
- [3] 靳友林. 中段弹道导弹及诱饵红外目标特性研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2004: 22-47.
- [4] 王慧频, 徐晖, 孙仲泰. 大气层外弹道式目标的红外辐射特性的理论计算方法 [J]. 系统工程与电子技术, 1998(3): 1-6.
- [5] 申文涛, 朱定强, 蔡国飙. 中段弹道目标的温度场与红外辐射特性计算 [J]. 宇航学报, 2010, 31(9): 2210-2217.
- [6] Wu X D, Lv X Y, Yang H, et al. Surface Temperature Distribution and Infrared Radiation Feature of a Spatial Balloon Decoy [C]. International Symposium on Photo electronic Detection & Imaging 2009, California: Proc. of SPIE, 2009, 73831M: 1-10.
- [7] 刘涛, 姜卫东, 黎湘, 等. 弹道中段目标动态红外辐射特性仿真计算 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(6): 955-958.

(下转第 48 页)