

大气层外弹道目标红外辐射特性研究

戴桦宇¹ 张雅声² 周海俊² 赵 双¹

(1. 航天工程大学研究生院, 北京 101416; 2. 航天工程大学航天指挥学院, 北京 101416)

摘 要: 针对来袭弹道导弹大气层外飞行过程中的目标识别问题, 提出了对弹道目标的红外辐射探测仿真方法。红外辐射特性是大气层外弹道式目标的基本特性之一, 也是开展目标识别的重要依据。对于弹道式目标的红外辐射特性识别的需求, 本文开展了天基红外传感器对大气层外弹道式目标探测红外辐射特性的建模与仿真研究工作。首先建立了天基红外传感器对大气层外弹道式目标探测的红外辐射计算模型, 接着基于 STK/EOIR 开展了典型目标的红外辐射特性仿真, 最后分析了弹头目标和诱饵的红外辐射特性。

关键词: 大气层外; 弹道式目标; 红外辐射特性; STK/EOIR

中图分类号: V241.6 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2018.08.009

Study on infrared radiation characteristics of exoatmosphere ballistic target

DAI Hua-yu¹ ZHANG Ya-sheng² ZHOU Hai-jun¹ ZHAO Shuang¹

(1. Department of Graduate Management, Space Engineering University, Beijing 101416, China;

2. Department of Space Equipment, Space Engineering University, Beijing 101416, China)

Abstract: Aiming at the problem of target identification for an incoming exoatmosphere ballistic missile, it is proposed a ballistic target infrared radiation detection simulation method. The infrared radiation characteristic is one of the basic characteristics of the project-type target in the atmosphere. It is also an important basis for target recognition. For the infrared radiation characteristic identification of the ballistic target, the modeling and simulation of infrared radiation characteristics of the earth-based infrared sensor are established. Firstly, the ballistic targets are classified and the recognition principle is summarized; Then the infrared radiation of typical targets is simulated based on the STK/EOIR module; Finally, the infrared radiation characteristics of target and decoy are analyzed.

Key words: exoatmospheric; ballistic target; the infrared radiation characteristics; STK/EOIR

1 引 言

弹道导弹大气层外红外辐射特性是预警系统信息处理技术的基础和关键。目标的红外辐射特性是指目标红外辐射的空间分布、随波长的分布和随时间变化的规律, 是目标物理特征和动力学特征的集

中反映。

目前, 国内研究弹道目标红外辐射特性主要集中在目标表面温度分布研究, 根据热力学原理, 通过建立目标表面微元热平衡方程, 采用数值求解的方法得到目标表面温度分布, 然后根据普朗克定律计

基金项目: 国家 863 基金项目(No. 2015AA7046104) 资助。

作者简介: 戴桦宇(1992-), 男, 硕士研究生, 研究方向为航天任务分析和设计。E-mail: 948791290@qq.com

收稿日期: 2017-12-25; 修订日期: 2018-01-26

算分析目标自身红外辐射特性^[1-3]。国外关于弹道目标红外辐射特性的研究,已经从简单的目标红外辐射特性及其变化规律,发展到考虑目标不同运动状态以及在多种环境下的红外辐射特性研究,并且已经开发了许多相关的仿真计算软件。典型的包括 OPTISIG (Optical signature In-line Generator) 和 OSC (Optical Signatures Code) 弹道导弹目标红外辐射特性建模分析工具,以及 SENSAT、SINDA 和 VISIG 等^[4-5] 形成了涵盖从可见光到长波红外波段范围的目标红外辐射特性分析与计算工业标准,广泛应用于导弹防御以及相关领域的建模与仿真分析中。

由美国 AGI 公司开发的 STK/EOIR 模块充分考虑了传感器、目标物体和环境之间的相互作用,建立了高可信度的光电传感器模型,可以方便地进行集成一体化多波段、多视场、多目标的传感器任务设计,适用于低轨预警系统对中段弹道目标的探测与成像仿真研究。本文在分析大气层外弹道式目标及其红外特征的基础上,构建了目标的几何模型、红外辐射模型和天基平台的传感器探测模型,并利用 STK/EOIR 模块开展了大气层外弹道式目标的红外辐射特性仿真实验,结果可为弹道导弹大气层外目标识别提供技术支持。

2 大气层外弹道式目标的面元分割方法

大气层外弹道式目标在飞行的过程中能够呈现多种形状,如图 1 所示,典型的包括锥形、球形、立方体以及这些简单结构体的组合等。采用面元分割的方法对大气层外弹道式目标的表面红外辐射特性进行分析。每个面元的温度分布均匀,物理性质也相同,面元的法向由父体目标的位置及方位确定。

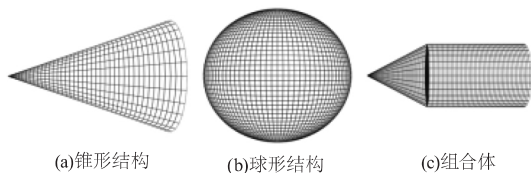


图 1 大气层外目标几何模型

Fig. 1 Atmospheric target geometry model

3 大气层外弹道式目标红外辐射计算模型

3.1 目标红外辐射计算模型

不用考虑大气的衰减,目标表面面元所获得的辐射能量包括目标自身的辐射 I_s 和反射的辐射 I_f 两

部分^[6]:

$$I_{sf} = I_s + I_f \tag{1}$$

(1) 目标自身辐射

在得到目标表面发射率和温度分布情况后,目标表面每个面元 I 的自身辐射可以用普朗克公式,对红外波段范围积分得到:

$$I_s = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\varepsilon_\lambda T c_1}{\lambda^5 [\exp(hc_2/\lambda T_i) - 1]} d\lambda \tag{2}$$

其中, λ_1 、 λ_2 为探测波段范围的临界值; T_i 为面元表面温度; h 为普朗克常数, $h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$; ε_λ 为目标表面发射率; c_1 为第一辐射常数, $c_1 = 3.742 \times 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$; c_2 为第二辐射常数, $c_2 = 1.4388 \times 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^2$ 。

(2) 目标反射辐射

太阳的辐射方式主要为可见光,忽略地球表面反射的太阳红外辐射、面元与面元之间表面辐射的反射相对地球辐射、太阳辐射,简化后的目标面元 i 反射辐射的表达式为^[7]:

$$I_f = \left[\sum_{i=\text{src}} (E_\lambda(i) \cdot (\hat{l}(i) \cdot \hat{N}) \cdot F) + E_\lambda^{\text{bkg}}/\pi \right] \cdot \rho_\lambda \tag{3}$$

式中, ρ_λ 为面元表面在红外波段为 λ 的反射率; $\hat{l}(i)$ 为入射辐射的方向余弦; \hat{N} 面元的单位法向量; F 为双向反射分布函数; E_λ^{bkg} 是一般背景光谱辐照,包括地球自身红外辐射、地球反照太阳光辐射、大气光晕等空间背景环境; $E_\lambda(i)$ 为来自第 i 个辐射源的光谱辐照度,其主要由太阳辐射及面元其他入射辐射组成。其中太阳辐射模型为:

$$E_\lambda^{\text{sun}} = L_\lambda^{\text{tab}} d\Omega^{\text{sun}} \tag{4}$$

式中, L_λ^{tab} 为光谱辐射强度测量表 (ASTME - 490); Ω^{sun} 为太阳相对面元 dA 的立体角,综合考虑其自身辐射及反射辐射,其计算模型为:

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

式中, P_ψ 是相位函数; Ω^{other} 为点辐射源相对面元 dA 的立体投影角。

目标表面其他面元辐射计算模型为:

$$E_\lambda(i) = \sum_{\text{tess}=k} \left[\left[\sum_{\text{src}=j} E_\lambda(j) \cdot (\hat{l}(j) \cdot \hat{N}(k)) \cdot F(\hat{l}(j), \hat{N}(k), \hat{\rho}) + E_\lambda^{\text{bkg}}/\pi \right] \cdot \rho_\lambda(k) + \varepsilon_\lambda B_\lambda(T(k)) \right] \cdot d\Omega(k)$$

(6)

式中, \sum_{sess} 为照射到面元 dA 的辐射总和; \sum_{src} 为照射到面元 k 的辐射总和; $\hat{I}(j) \cdot \hat{N}(k)$ 为面元 k 的所接收到辐射中入射方向的余弦。

3.2 传感器探测模型

影响传感器接收目标红外辐射和被观察目标的辐照度、探测器到目标的距离、目标——探测器之间夹角、大气的衰减效应、探测器视场范围大小等因素有关。假设目标面元 i 的表面积为 S_i ; 辐射通量为 M_i ; 面元 i 与成像系统的光瞳面的中心连线长度为 R ; 面元 i 的法线与连线 R 的夹角为 θ_1 , 接收辐射面的法线与 R 的夹角为 θ_2 , 如图 2 所示。

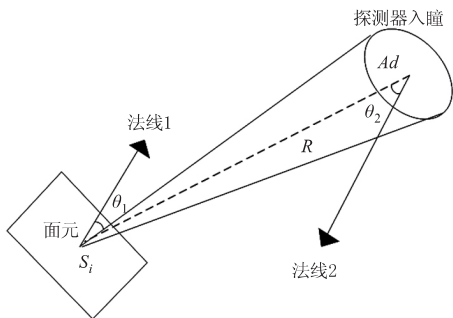


图 2 传感器成像系统接受面元辐照度示意图

Fig. 2 The sensor imaging system receives the surface element irradiance schematic diagram

传感器接收的目标红外辐射为:

$$H = \sum_{i=1}^N S_i F_{d_i} M_i \quad (7)$$

式中, F_{d_i} 为目标面元 i 与传感器光瞳面的探测角系数:

$$F_{d_i} = \begin{cases} \frac{\cos\theta_1 \cos\theta_2}{\pi R^2}, & \cos\theta_1 > 0 \\ 0, & \cos\theta_1 \leq 0 \end{cases} \quad (8)$$

4 仿真实验与结果分析

4.1 仿真流程设计

利用 EOIR 对大气层外目标进行红外辐射仿真流程图如图 3 所示。

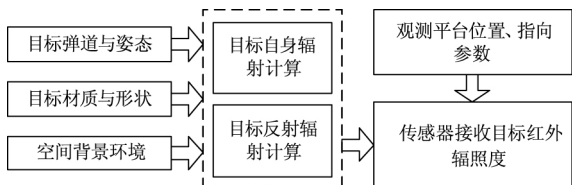


图 3 传感器探测目标红外辐射流程图

Fig. 3 Sensor detection target infrared radiation flow chart

具体流程为:

- (1) 利用 STK 姿轨模块导出弹道目标的轨道、姿态运动数据,同时生成观测平台轨道数据文件;
- (2) 根据目标表面材料、外形大小以及温度等属性,基于目标红外辐射计算模型计算目标面元的红外辐射特性,生成目标红外辐射数据;
- (3) 根据观测平台当前轨道位置和姿态数据文件以及传感器指向,结合坐标变换关系,计算每块面元在传感器入瞳处的辐照强度;
- (4) 对目标各面元在传感器入瞳处的辐照度进行叠加,计算得到目标在传感器入瞳处的红外辐照度。

4.2 仿真实验设计

(1) 利用观测平台分别对弹头和诱饵进行探测,平台轨道参数如表 1 所示。

表 1 平台轨道参数

Tab. 1 Platform orbital parameters

半长轴 a	轨道倾角 i	升交点 赤经 Ω	纬度幅角 u	偏心率 e	真近点角 f
7678.41 km	78°	29°	58°	0	0°

(2) 传感器参数: 根据美国在 1996 年发射的“弹道中段空间试验”(Midcourse Spaced Experiment, MSX) 卫星所携带的光学测量载荷“太空红外成像望远镜”(SPIRIT III) 给出的参数,其探测红外波段分别为^[8]: 6.03 ~ 10.91 μm , 11.1 ~ 13.24 μm , 13.5 ~ 16 μm , 三个不同波段采用相同参数传感器相机进行观测,具体参数如表 2 所示。

表 2 红外相机参数

Tab. 2 Infrared camera parameters

参数名	取值	参数名	取值
视场角	2° × 2°	$F/\#$	2.5
像素数	128° × 128°	有效焦距长度	100 cm
瞬时视场角	0.2727 mrad	入瞳直径	40 cm
焦平面像素尺寸	272.7354 μm	NEI/积分时间	$1 \times 10^{-18} (\text{W}/\text{cm}^2) / 100 \text{ ms}$
波段间隔数	6	SEI/积分时间	$3 \times 10^{-12} (\text{W}/\text{cm}^2) / 100 \text{ ms}$

(3) 大气层外目标参数: 设目标分别为导弹目标与诱饵目标构成目标群,导弹形状为圆锥形弹头与圆柱形弹体组合而成,诱饵则设计成球形,目标部分特性参数如表 3 所示,其他相关热物参数参见文

献 [9 - 12]。

(4) 导弹轨道参数: 设导弹的发射点为(78. 69° E 46. 12°N); 落地点为(110. 65°E ,67. 36°N) ,导弹飞行高度 1000km ,射程约为 5000km。对大气层外某一时间段进行仿真 ,诱饵与弹头的飞行轨迹近似相同。

表 3 目标特性参数

Tab. 3 Target characteristic parameter

	高度	半径	材料	温度
弹头	3.4 m	0.5 m	铝制多层隔离层	300 K
弹体	3.4 m	0.5 m	白色热控涂层	300 K
诱饵		0.5 m	银质多层隔离层	200 K

(5) 目标姿态运动参数: 根据相关资料可知^[13] ,导弹旋转速率 20 revs/min ,进动频率 3 revs/min ,进动角为 5°; 诱饵旋转速率 28 revs/min ,进动频率 4 revs/min ,进动角为 8°。

(6) 仿真场景时间: 场景开始时间为 2017 年 5 月 18 日 04 : 00 : 00 UTCG ,对目标飞行的大气层外中段进行仿真 ,仿真时间范围为目标发射后 240 s 至 540 s ,仿真步长为 1 s ,在该阶段内目标在阳光照射区飞行 ,具有良好的探测视场。

4.3 仿真结果分析

基于上述设置 ,利用天基红外传感器对分别对不同类型目标进行探测 ,获得各类目标在不同波段的红外辐照度。首先利用传感器对导弹的红外辐照度进行探测 ,结果如图 4 ~ 图 6 所示。

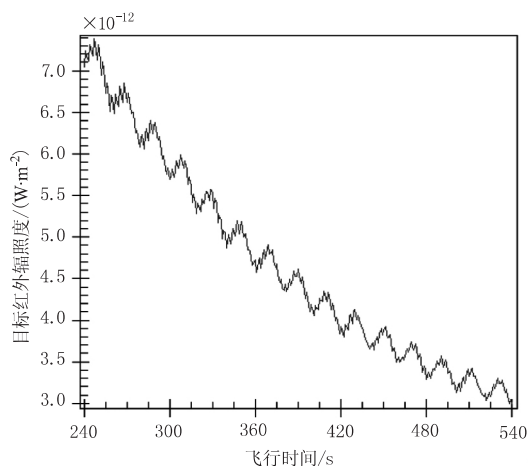


图 4 导弹辐照度变化(6. 03 ~ 10. 91 μm 波段)

Fig. 4 Variation of missile irradiance(6. 03 ~ 10. 91 μm)

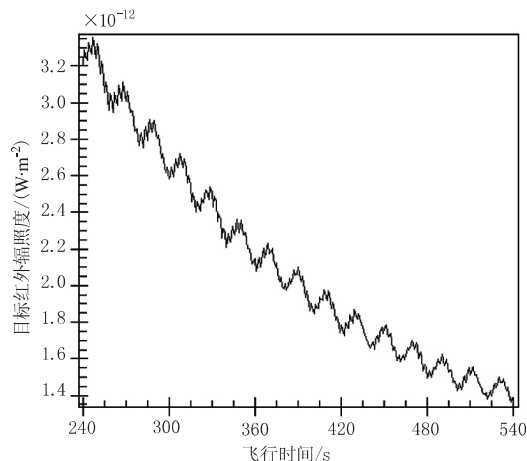


图 5 导弹辐照度变化(11. 1 ~ 13. 24 μm 波段)

Fig. 5 Variation of missile irradiance(11. 1 ~ 13. 24 μm)

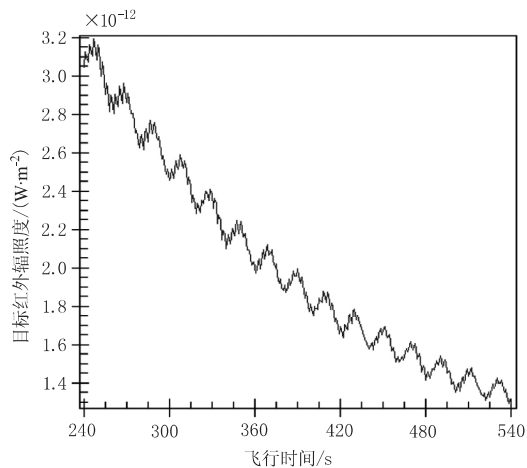


图 6 导弹辐照度变化(13. 5 ~ 16 μm 波段)

Fig. 6 Variation of missile irradiance(13. 5 ~ 16 μm)

图 4 ~ 图 6 是传感器 1 在不同波段针对同一目标进行探测的红外辐照度曲线 ,可以发现导弹目标辐照度曲线呈现长期、周期的变化现象。其中 ,呈现下降趋势的长期变化是由目标与传感器之间的相对距离逐渐变远造成的; 而周期的变化则是因为飞行过程中目标姿态发生改变使得辐射面积也随之变化 ,因此体现在传感器探测视场内所接收红外辐射也相应呈现周期性变化特征 ,即从传感器接收的目标红外辐射变化特性上可以看出目标的姿态运动变化特性。

除此之外还可以发现 ,传感器接收的导弹红外辐照度随着波长越长呈现递减的趋势 ,即 $E_{6.03 \sim 10.91} > E_{11.1 \sim 13.25} > E_{13.5 \sim 16.0}$,且在 6. 03 ~ 10. 91 μm 波段范围内的接收的目标红外辐照度比 11. 1 ~ 13. 25 μm、13. 5 ~ 16. 0 μm 波段的大得多 ,说明在本仿真

场景下传感器接收的导弹红外辐射主要集中在中波红外范围内。

其次利用传感器对诱饵的红外辐照度进行探测,结果如图7~9所示。

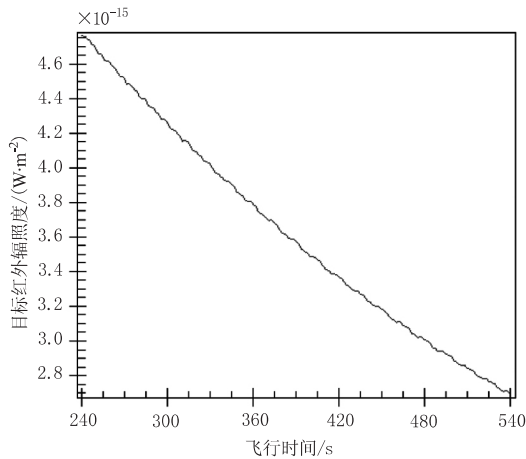


图7 诱饵辐照度变化(6.03 ~ 10.91 μm 波段)

Fig.7 Variation of bait irradiance(6.03 ~ 10.91 μm)

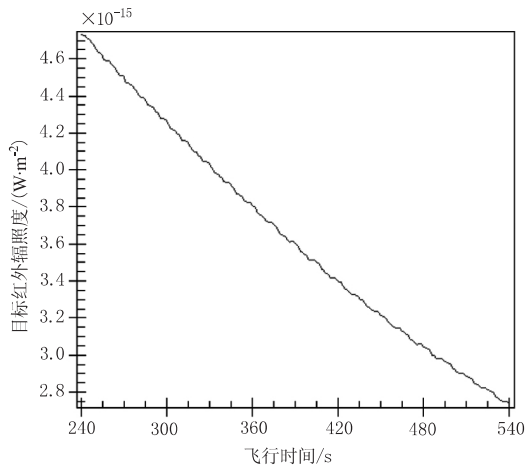


图8 诱饵辐照度变化(11.1 ~ 13.24 μm 波段)

Fig.8 Variation of bait irradiance(11.1 ~ 13.24 μm)

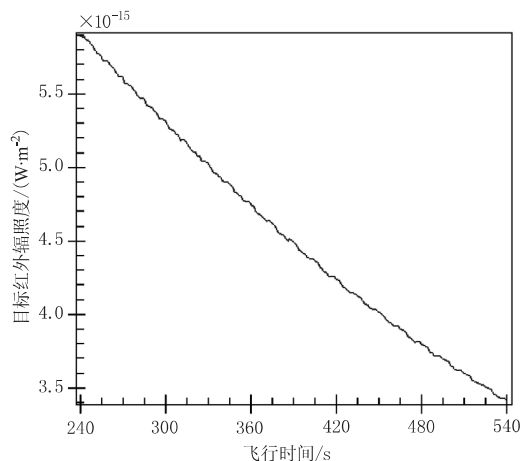


图9 诱饵辐照度变化(13.5 ~ 16 μm 波段)

Fig.9 Variation of bait irradiance(13.5 ~ 16 μm)

综合对比诱饵与导弹的红外辐照度曲线图,可以发现相同的深空探测背景下导弹的红外辐照度处在 10^{-12} 数量级,比诱饵大了3个数量级,差距显而易见。分析可知,造成这种差距的主要原因有两个:首先是诱饵的平衡温度小于弹头^[14],因此诱饵表现出的红外辐射特性较弹头来说并不强烈;其次是覆盖在诱饵与导弹表面的涂料设置并不相同,因此其红外发射率也会有所差别。在两方面的共同作用下造成了弹头与诱饵两个目标的红外辐照度差异。

还有一个值得注意的地方,就是从图7~图9可以看出,虽然在中波、中长波、长波的红外波段范围之间诱饵的红外辐照度差距甚微,但是在长波范围内诱饵的辐照度取值与其他两个波段相比明显较大,这种现象也遵循了灰体红外辐射定律:目标的温度越低,其自身的红外辐射更倾向于集中在长波范围。这也进一步证明了利用EOIR模块对大气层外弹道式目标进行红外探测仿真的正确性。

此外,观察导弹和诱饵的辐照度曲线的总体变化趋势,不难发现诱饵的辐照度曲线变化更为平缓,相比之下导弹的曲线起伏就较为强烈。这是由于诱饵外形为球形,而导弹则是锥柱组合体,进入传感器视场的有效辐射面积不同,诱饵基本上为表面积积的1/4,相比较之下导弹进入视场的辐射面积要复杂的多,因此导弹在飞行过程中姿态运动对传感器获取红外信息的影响比诱饵大,这也丰富了大气层外目标的红外识别手段。

5 结论

本文针对天基红外传感器对大气层外弹道式目标探测问题,从目标的红外辐射特性出发,通过STK/EOIR模块对典型弹道式目标的红外辐射特性进行了仿真分析,得到了如下结论:

(1) 在本文的仿真条件下,弹头和诱饵在大气层外的红外辐照有明显的差距,相差了3个数量级,证明了利用红外辐照度进行目标识别的可行性。

(2) 在本文仿真条件下,导弹和诱饵的红外辐照度分别集中在中波红外范围和长波红外范围,红外辐照度曲线变化程度也存在着明显区别,能够为红外传感器的研制提供了一个新的思路。

参考文献:

- [1] WANG Hongyuan, CHEN Yun. Modeling and simulation

- of infrared dynamic radiation of space - based target infrared[J]. *Infrared and Laser Engineering* ,2016 ,45(5) : 11 - 17. (in Chinese)
- 汪洪源 陈赞. 天基空间目标红外动态辐射特性建模与仿真[J]. *红外与激光工程* 2016 ,45(5) : 11 - 17.
- [2] YANG Hua ,YIYimin ,LI Qiang. Research on infrared radiation distribution of project - type targets in the atmosphere[J]. *Infrared and Laser Engineering* ,2005 ,34(2) : 174 - 176. (in Chinese)
- 杨华 宣益民 李强. 大气层外弹道式目标红外辐射分布研究[J]. *红外与激光工程* . 2005 ,34(2) : 174 - 176.
- [3] ZHANG Jun ,LIU Rongzhong ,GUO Rui. The surface dynamic thermal radiation of the target surface of high - speed projectile arrows [J]. *Journal of Aerospace Power* , 2017 ,32(2) : 289 - 297. (in Chinese)
- 张俊 刘荣忠 郭锐,等. 高速飞行弹箭目标表面动态热辐射[J]. *航空动力学报* 2017 ,32(2) : 289 - 297.
- [4] David R Tanks. National missile defense: policy issues and technological capabilities [R]. USA: Svec Conway Printing ,Inc 2000.
- [5] Martin M ,Berdahl P. Characteristics of infrared sky radiation in the United States [J]. *Solar Energy* ,1984 ,33(3) : 321 - 336.
- [6] HU Wei ,YANGjianjun ,WANG Sen. Mathematical modeling and simulation of infrared radiation characteristics of mid - range ballistic missile [J]. *Optoelectronic Technology* ,2009 ,29(4) : 240 - 243. (in Chinese)
- 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.
- [7] Anderson R ,Cantwel G. STK/EOIR Model Description and Validation [R/OL]. [2010 - 12 - 09] <http://www.agi.com/eoir>.
- [8] John D Mill ,John T. Stair. MSX design driven by targets and backgrounds [C]. AIAA ,The 35th Aerospace Sciences Meeting & Exhibit ,1997 ,0308: 1 - 12.
- [9] FAN Jinxiang , YUE Yanjun. Modeling and simulation software development of infrared characteristics of target and scene [J]. *Infrared and Laser Engineering* ,2008 ,37(supplement) : 389 - 396. (in Chinese)
- 范晋祥 岳艳军. 目标与场景的红外特性建模与仿真软件的发展[J]. *红外与激光工程* ,2008 ,37(增刊) : 389 - 396.
- [10] LIU Tao. Research on infrared imaging detection and identification of middle segment ballistic target groups [D]. Changsha: National University of Defense Technology 2011. (in Chinese)
- 刘涛. 中段弹道目标群天基红外成像探测与识别技术研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学 2011.
- [11] Fetter Sessler , John M. Cornwall ,Bob Dietz et al. Countermeasures: A Technical Evaluation of the Operational Effectiveness of the Planned US National Missile Defense System [R]. USA: Union of Concerned Scientists 2000.
- [12] ZHOU Haiun ,LI Zhi ,LI Xuejun. Study on infrared radiation characteristics of mid - range targets based on STK/EOIR [J]. *Infrared* ,2017 ,38(2) : 21 - 25. (in Chinese)
- 周海俊 李智 李学军. 基于 STK/EOIR 的弹道中段目标红外辐射特性研究[J]. *红外* ,2017 ,38(2) : 21 - 25.
- [13] WANG Lei ,CAI Yuanwen. Design and study of the infrared decoy of infrared decoys in the middle section of ballistic missile [J]. *Aerospace Control* ,2010 ,28(4) : 86 - 89. (in Chinese)
- 王磊 蔡远文. 弹道导弹中段突防红外诱饵空域设计研究[J]. *航天控制* ,2010 ,28(4) : 86 - 89.
- [14] YAO Lianxing ,HOU Qiuping ,LUO Jiqiang. Study on the surface temperature and infrared penetration of the target surface of a ballistic missile [J]. *Aerospace Electronic Warfare* ,2005 ,21(2) : 5 - 6. (in Chinese)
- 姚连兴 侯秋萍 罗继强. 弹道导弹中段目标表面温度与红外突防研究[J]. *航天电子对抗* ,2005 ,21(2) : 5 - 6.