

引用格式: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. DAI H Y, ZHANG Y S, ZHOU H J, et al. Infrared imaging simulation of midcourse ballistic target based on STK/EOIR[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(1):1-5.

## 基于 STK/EOIR 的弹道目标中段红外成像仿真研究

戴桦宇<sup>a</sup>, 张雅声<sup>b</sup>, 周海俊<sup>b</sup>, 赵双<sup>a</sup>

(航天工程大学, a. 研究生院; b. 航天装备系, 北京 101416)

**摘要:** 弹道目标红外成像是导弹预警信息处理的基础。提出了一种天基红外预警系统对弹道中段目标红外成像的仿真方法。首先建立了中段目标天基红外成像的点源成像模型;而后构建了基于 STK/EOIR 的弹道中段目标天基红外动态成像仿真架构;最后对中段目标(群)开展了多平台、多波段的红外成像仿真,分析得到了传感器对中段目标群动态成像特点。

**关键词:** 弹道目标; 红外成像; STK/EOIR; 中段目标

**中图分类号:** TN21 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2018.01.001

## Infrared Imaging Simulation of Midcourse Ballistic Target Based on STK/EOIR

DAI Hua-yu<sup>a</sup>, ZHANG Ya-sheng<sup>b</sup>, ZHOU Hai-jun<sup>b</sup>, ZHAO Shuang<sup>a</sup>

(Aerospace Engineering University, a. Graduate School; b. Department of Space Equipment, Beijing 101416, China)

**Abstract:** Ballistic target infrared imaging is the basis for processing the early warning information of missiles. A simulation method was given for simulating the infrared imaging of space-based infrared warning system to ballistic midcourse target. First, the point source imaging model of space-based infrared imaging was established for midcourse target. Then, the simulation architecture of space-based infrared imaging was constructed for ballistic midcourse target based on Satellite Tool Kit/Electro-optical Infrared Sensor (STK/EOIR). Finally, simulation was carried out for the infrared imaging of midcourse target (group) on multiple platforms and multiple wavebands. Analysis was made to obtain dynamic imaging characteristics of the midcourse targets.

**Key words:** ballistic target; infrared imaging; STK/EOIR; midcourse target

### 0 引言

弹道目标红外成像是导弹预警信息处理的基础。国外已经从简单的目标红外成像发展到考虑目标不同运动状态以及在多种环境下的红外成像仿真,并开发了较为成熟的系统可视化仿真软件<sup>[1-3]</sup>。国内在该领域也取得了不少研究成果,但是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<sup>[4-6]</sup>。美国 AGI 公司的 EOIR 模块充分考虑了传感器、目标以及环境等因素的相互作用,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的传感器任务设计以及仿真<sup>[7-8]</sup>。本文通过构建基于 STK/EOIR (Satel-

lite Tool Kit/Electro-Optical Infrared Sensor) 的动态成像仿真架构,开展低轨红外传感器对弹道中段目标的红外成像仿真研究。

### 1 点源成像模型

针对低轨预警系统的传感器对中段目标成像是采用点源成像模型还是面源成像模型,与目标的尺寸大小、传感器的空间分辨率有关<sup>[9]</sup>。目标在传感器焦平面上的成像效果可以通过目标对传感器像元的投影立体角来判断。目标在传感器视场中的投影立体角  $\Omega_T$  可以近似地表示为

$$\Omega_T = \frac{A_T^*}{R^2} \quad (1)$$

式中: $R$  为目标至传感器的距离; $A_T^*$  为目标在传感器视场内的有效投影面积,即

$$A_T^* = \int_{A_w} \cos(\theta(\mathbf{x})) dA \quad (2)$$

收稿日期:2017-08-07 修回日期:2017-10-16

基金项目:国家自然科学基金(61304228)

作者简介:戴桦宇(1992—),男,甘肃陇南人,硕士生,研究方向为空间目标识别。

式中: $A_{\text{obj}}$ 为目标的表面面积; $\theta(\mathbf{x})$ 为目标表面面元法线矢量与传感器视线矢量的夹角。

传感器焦平面上单个像元的有效瞬时视场角(Instantaneous Field of View, IFOV)可以表示为

$$\begin{cases} A_{\text{IFOV,H}} = 2\arctan\left(\frac{p_x}{2f}\right) \\ A_{\text{IFOV,V}} = 2\arctan\left(\frac{p_y}{2f}\right) \end{cases} \quad (3)$$

式中: $A_{\text{IFOV,H}}$ , $A_{\text{IFOV,V}}$ 分别为焦平面单个像元的水平瞬时视场角和垂直瞬时视场角,代表了像元的空间角分辨率,单位为 $\mu\text{rad}$ ;  $p_x$ ,  $p_y$ 分别为像元水平方向和垂直方向的尺寸大小,单位为 $\mu\text{m}$ ;  $f$ 为传感器的等效焦距。以本文所用传感器(弹道中段空间试验卫星(Midcourse Spaced Experiment, MSX)所携带的光学测量载荷太空红外成像望远镜(SPIRIT III))给出的参数为例,计算可得传感器单个像元尺寸大小和瞬时视场角分别为

$$\begin{cases} p_x = p_y = 272.74 \\ A_{\text{IFOV,H}} = A_{\text{IFOV,V}} = 272.7^\circ \end{cases} \quad (4)$$

对于中段弹道导弹目标,以民兵III为例,弹头近似为高1.83 m、底面直径0.56 m的圆锥;假设其投影面积近似为长1.83 m、宽0.56 m的矩形<sup>[10]</sup>,则有效投影面积为1.0248 m<sup>2</sup>。对于直径为2 m的球状诱饵,有效投影面积为3.14 m<sup>2</sup>。表1给出了在不同距离下弹头和诱饵在传感器视场内的投影立体角 $\Omega_T$ 计算结果。

表1 不同距离下目标在传感器视场内的投影立体角  
Table 1 The projected solid angle of the target in the field of view of the sensor at different distances

目标类型	相对距离/km			
	200	600	1000	1400
弹头	1.5E-3	1.63E-4	5.87E-5	3.0E-5
球状诱饵	4.5E-3	5E-4	1.8E-4	9.18E-5

由表1中计算结果可知,弹头和诱饵目标在传感器视场内的投影立体角远远小于传感器像元的有效瞬时视场角( $\Omega_T \ll A_{\text{IFOV,H}}$  &  $\Omega_T \ll A_{\text{IFOV,V}}$ )。因此,低轨红外凝视传感器对中段目标的成像可以认为是点源成像效果。接下来开展基于点源成像的低轨红外传感器对中段目标的成像研究。

## 2 基于 STK/EOIR 模块的仿真构建方法

基于 STK/EOIR 模块构建的低轨红外传感器对弹道中段目标的红外成像仿真流程如图1所示。

EOIR 模块利用自定义的目标对象,在合成场景生成中对目标的红外成像特性进行建模,然后通过传感

器接收得到目标的红外成像图片。在建模对象中,用户可以自定义目标的形状、尺寸、材质等与红外成像相关的参数,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;在合成场景生成中,EOIR 考虑了包括像元响应信号在内的成像模型,能够对目标在空间环境中的红外成像进行建模;在传感器模型方面,可以定义传感器视场、视线抖动幅度、探测波段等参数,最后得到传感器对中段单目标及多目标的红外成像示意图。

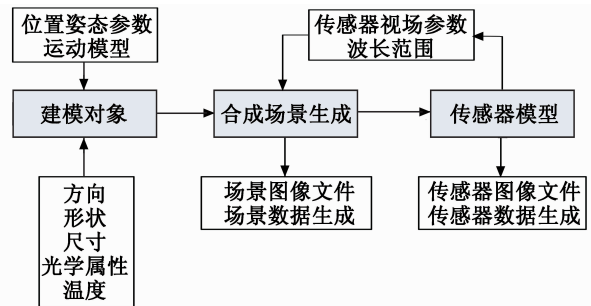


图1 中段目标红外成像仿真流程示意图

Fig. 1 Sketch map of infrared imaging simulation process of midcourse target

本文构建的基于 EOIR 模块的红外成像模型充分利用了 STK 内嵌的空间目标高精度姿轨运动模型,并综合考虑传感器、目标、环境之间的相互作用,增加了成像仿真的逼真度。

## 3 仿真实验与结果分析

### 3.1 仿真场景设计

利用 Walker- $\delta$  星座对目标进行探测仿真。星座参数如表2所示。

表2 天基低轨预警 Walker- $\delta$  星座基本参数<sup>[11]</sup>

Table 2 Basic parameters of space-based Leo warning Walker- $\delta$  constellation

卫星数量	轨道平面	相位因子	轨道高度/km	轨道倾角/(°)
28	4	2	1598	78

根据星座部署情况,发现编号2-3(第2轨道面第3颗卫星)与编号4-1(第4轨道面第1颗卫星)的卫星对目标的探测时间较长,下面就利用这2颗卫星所搭载的传感器对目标进行红外辐射探测及成像仿真。

1) 传感器参数设置。平台的传感器参数设置参考弹道中段空间试验(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<sup>[12]</sup>,红外探测波段分别为6.03~10.91  $\mu\text{m}$ (中波),11.1~13.24  $\mu\text{m}$ (中波长),13.5~16  $\mu\text{m}$ (长波)。传感器其

他参数如表3所示。

表3 传感器相机参数设置

Table 3 Sensor camera parameters setting

参数名称	取值	参数名称	取值
视场角/(°)	2×2	F数	2.5
像素数	128×128	有效焦距长度/cm	100
瞬时视场角/mrad	0.2727	入瞳直径/cm	40
焦平面像素尺寸/ $\mu\text{m}$	272.7354	噪声等效辐照度/( $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	$1\times 10^{-18}$
波段间隔数	6	传感器辐照饱和度/( $\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	$3\times 10^{-12}$

2) 中段目标群设置。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。根据文献[12-13]中材质的平衡温度计算结果分别设定各目标在中段飞行过程中的平衡温度及材质属性,如表4所示。

表4 目标群材质参数设置

Table 4 Material parameter setting of target group

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

3) 目标轨道参数。设导弹的发射点为(78.69°E, 46.12°N);落地点为(110.65°E, 67.36°N),导弹采用弹道式飞行,最大飞行高度为1000 km,射程约为5000 km。对大气层外某一个时间段进行仿真,诱饵与弹头的飞行轨迹近似相同。

4) 目标姿态运动参数。根据相关资料可知<sup>[14]</sup>,导弹旋转速率为20 r/min,进动频率(速率/速度)为3 r/min,进动角为5°;诱饵旋转速率为28 r/min,进动频率(速率/速度)为4 r/min,进动角为8°。

### 3.2 仿真结果与分析

#### 3.2.1 传感器对单目标观测成像

首先采用预警卫星对弹道中段弹头目标进行观察成像,在EOIR模块中设目标始终在传感器光轴所指方向,图2为理想情况下编号2-3预警卫星携带传感器对单个目标在不同波段的红外成像示意图。

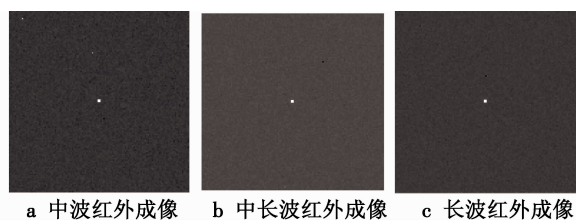


图2 中段弹头目标红外成像效果

Fig. 2 The middle warhead target infrared imaging effect

由图2可见,尽管成像波段范围不同,但弹道中段弹头目标的红外成像都主要集中在传感器视场中央以

点源目标的形式呈现出来,并且能明显看出弹头目标的红外辐射能量主要聚集在传感器视场中心的像素点内。

不同波段的红外成像效果差异主要体现在2个方面:1) 弹头目标像点的暗弱程度不同,针对本文中的目标弹头而言,中波红外波段的目标亮度较中长波和长波红外的更为显著;2) 不同红外波段下空间背景天体(恒星、其他卫星或空间碎片等)在焦平面上的暗弱程度不同,在中波红外成像上可以看见空间背景天体的模糊点像,而在中长波和长波红外图像上空间背景天体则被淹没在背景噪声中。

图3所示为传感器视线光轴抖振幅度为10 mrad时目标在传感器焦平面的像。

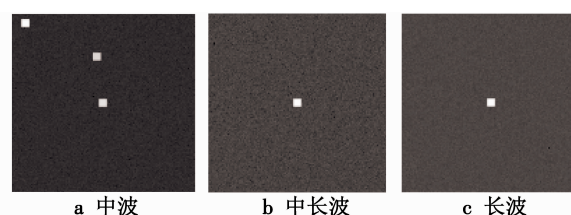


图3 设置视线抖动后目标成像效果图

Fig. 3 Target imaging effect after setting the line of sight jitter

由图3可见,目标和空间天体的像在传感器焦平面内不再是单个像素点,而是以投影点为中心的相邻几个像素。这主要是因为,视线抖振使得目标(或空间天体)在焦平面上的投影位置在相邻像素上变化,在积分时间内,目标(或空间天体)的辐射能量分布在这些像素点上。

需要说明的是,在本文中传感器输出的是经过自适应增益控制处理后的焦平面图像。图3较之于图2,目标和空间天体的像更清晰,但不代表图3的成像质量更高,实际上,较之于图3的像点,图2的成像质量更高。这是因为在图2中,目标辐射能量都集中于中心像素点,目标信噪比较高,有利于目标检测处理;而图3中传感器视线抖振使得目标能量分散在多个像元上,降低了图像的信噪比,不利于目标的检测处理。

#### 3.2.2 传感器对目标群观测成像

以弹头目标的弹道参数为中心,随机生成一次性释放的20个诱饵目标或干扰物,形成以弹头为中心的伴飞目标群。目标类型包括弹头、轻/重诱饵、母舱、火箭末级以及释放过程中产生的空间碎片;目标构型涵盖柱体、锥体、圆盘、立方体、球体和连接件,以及由这些简单构型组合成的复杂目标;目标材质包括白色热控材料、铝漆、黑漆、石墨敷层、抛光金片、银质敷层以及可自定义发射率和反射率的灰体。利用文献[9-10]中材质的平衡温度计算结果分别设定各目标在中段飞行过程中的平衡温度及材质属性。



仿真中星座参数不变,选取同样的 2 颗卫星对目标进行成像仿真。成像过程中传感器光轴始终指向目标群中心(即弹头目标),部分成像结果如图 4 和图 5 所示。

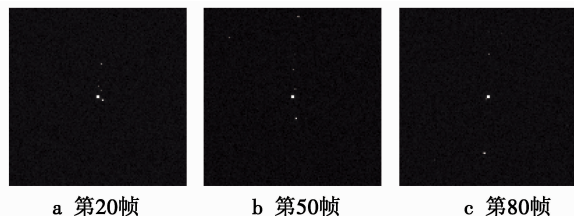


图 4 平台 2-3 中段目标群中波红外成像

Fig. 4 Medium wave infrared imaging of platform 2-3 middle target group

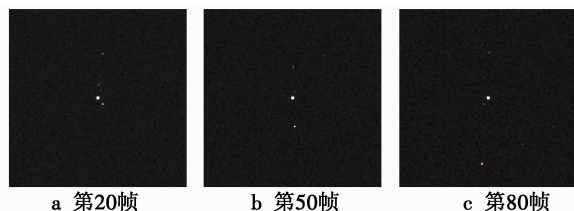


图 5 平台 4-1 中段目标群长波红外成像

Fig. 5 Long wave infrared imaging of platform 4-1 middle target group

分析图 4 和图 5 的成像结果,可以得出低轨预警星座中段目标群成像具有以下特点。

1) 初始阶段目标群在传感器视场中会形成重叠的模糊像斑(图 4a)。出现这种现象的原因主要有 2 个:

① 由于在诱饵初始释放阶段,目标之间的距离较近,没有达到传感器空间分辨率分辨相近目标的最低间距;

② 目标可能和传感器的光轴指向处于相同方向,从而目标在焦平面的投影正好位于同一像元或者相邻像元上,因此无法分辨。

2) 在同一视场内像点的明暗程度不一样。分析主要由以下原因导致成像差异:

① 不同目标因为温度、材质属性以及与传感器相对距离等的不同,使得目标到达传感器入瞳处的红外辐射强度不一样;

② 多个不同目标在传感器焦平面上投影恰好为同一个或相邻像元,相应像元的响应为多个不同目标红外辐射响应的叠加。此外,还存在一个现象就是视场内可分辨点数远远小于仿真中目标的总数,分析除了上述原因之外,还有一个原因是部分目标温度较低,目标的红外辐射响应被淹没在传感器系统噪声响应中而无法被检测出来。因此,低信噪比条件下的微弱目标检测是中段目标探测、跟踪与识别的关键技术。

3) 随着时间推移,目标像斑在传感器视场中会发

生分裂、融合以及再分裂、再融合等现象。出现这种现象的一个重要原因是:观测平台与目标群处于高速运动状态,传感器视场对目标群的观测角度不断发生变化,使得目标在传感器焦平面上的投影位置随时都在发生改变,从而导致像斑数目的减少或增加。此外,从同一个观测平台上看,随着时间推移,像斑数目总体上逐渐增加,像斑面积逐渐减少,这表明可检测分离的目标数越来越多。分析原因,主要是因为随着时间的推移,目标间的距离变大,可以逐渐被传感器所分辨,最终目标群内的各目标在传感器视场中都能独立占据一个像素点。

4) 目标群在两个观测平台焦平面上的扩散速率是不一致的,这除了目标群扩散运动对于不同平台上的传感器的观测视角存在差异之外,平台与目标群的相对距离也是一个重要的影响因素。平台靠近目标群时,焦平面上目标群的扩散速率加快;平台远离目标群时,焦平面上的目标群扩散速率减慢。图 5 的目标扩散速率快于图 4,实际上这是因为平台 4-1(图 5)与目标群的相对距离快速减少,而平台 2-3(图 4)与目标群的相对距离则缓慢增加。此外,当平台与目标群相对距离增加对成像的影响超过目标群扩散对成像的影响时,焦平面上的目标群运动甚至有可能发生“收缩”的现象。

5) 对比图 4 和图 5 可以发现,由于观测平台、成像波段、观测视角的不同,均会造成成像的像点亮度和像点空间分布存在差异。前者(像点亮度)主要与平台和目标的相对距离以及传感器的红外波段范围有关,而后者(像点空间分布)则是因为不同平台的观测视角的差异导致焦平面上目标群分布疏密程度不一样。可见,这种多平台、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,有利于提高目标的检测与识别的处理能力。

## 4 总结

本文提出的基于 STK/EOIR 的红外成像仿真方法可通过参数配置方便地进行低轨红外传感器对弹道目标的多平台、多波段、多视角成像仿真,结果表明,传感器的观测视角、观测距离、视线抖动幅度与成像波段是影响低轨红外传感器对弹道中段目标成像的重要因素。

## 参考文献

- [1] TANKS D R. National missile defense: policy issues and technological capabilities [R]. USA: Svec Conway Printing, Inc., 2000.

- [2] 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(s2):389-396.
- [3] 张雪,梁晓庚. 红外探测器发展需求[J]. 电光与控制,2013,20(2):41-45.
- [4] 周晓东,郭明. 空间目标动态红外图像的计算机生成[J]. 红外与激光工程,2007,36(1):5-8.
- [5] 林两魁. 天基红外传感器对中段弹道目标群的跟踪与超分辨技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2011.
- [6] 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.
- [7] ANDERSON R, CANTWEL G. STK/EOIR model description and validation[R/OL]. [2010-12-09]. <http://www.agi.com/eoir>.
- [8] 周海俊. 低轨预警系统对中段目标探测与跟踪关键技术研究[D]. 北京:中国人民解放军装备学院,2017.
- [9] 刘志刚. 红外成像点目标的检测与识别技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2005.
- [10] 张慧. 天基红外传感器对中段目标群跟踪技术研究[D]. 长沙:国防科学技术大学,2014.
- [11] 简平. 天基低轨预警系统设计与任务规划研究[D]. 北京:中国人民解放军装备学院,2013.
- [12] 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.
- [13] FETTER S, SESSLER A M, CORNWALL J M, et al. Countermeasures;a technical evaluation of the operational effectiveness of the planned US national missile defense system[J]. Journal of Bacteriology, 2000, 188(2):450-455.
- [14] 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.

## 下 期 要 目

基于拟合与插值的受油机前扰波建模与分析  
 航母姿态对光电标校装置测量精度的影响分析  
 一类输入受限不确定非线性系统的有限时间控制  
 基于交错稀疏阵列优化的雷达-通信共享孔径方法  
 面向战备任务的装备质量状态评估指标优化  
 四旋翼机动动作最优控制模型设计  
 紧组合下的 GPS 诱骗及其识别的仿真分析

基于 AMPSO 算法的无人机任务分配问题研究  
 未知杂波下多目标跟踪 AEM-PHD 平滑滤波算法  
 一种改进的雷达与干扰分布式仿真方法  
 基于盲源分离算法的混叠电磁信号分离研究  
 基于超像素分割和混合权值 adaboost 运动检测算法  
 综合模块化航空电子软件分布式测试平台研究  
 无人机固定航路规划与质量评价



请扫描二维码关注我刊