

文章编号: 1671-0576(2024)01-0053-08

# 复杂地表背景下动目标天基红外探测图像仿真

刘健<sup>1</sup>, 李朋远<sup>2</sup>, 杜君<sup>1</sup>, 孟夏莹<sup>1</sup>

(1. 散射辐射全国重点实验室, 上海 200438; 2. 北京跟踪与通信技术研究所, 北京 100094)

**摘要:** 面向天基红外探测图像仿真需求, 基于导弹内外流场的流动控制方程和辐射计算方程构建弹道导弹辐射仿真模型, 基于全球地表类型数据库(GlobCover)和随机分形算法构建复杂地表背景辐射仿真模型, 基于严密成像几何模型提出星载相机入瞳处场景耦合辐射仿真方法。进一步叠加探测系统成像链路中的光学系统、探测器和信号处理模型, 提出一种复杂地表背景下运动目标天基红外探测图像仿真方法。仿真结果表明, 利用卫星轨道参数和导弹目标弹道数据, 采用该方法可以实现卫星对弹道导弹主动段的连续成像仿真。

**关键词:** 红外图像; 天基探测; 地表背景; 导弹辐射

**中图分类号:** V19

**文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1671-0576.2024.01.009

## Simulation of Space-based Infrared Detection Images for Moving Targets in Complex Earth Surface Background

LIU Jian<sup>1</sup>, LI Pengyuan<sup>2</sup>, DU Jun<sup>1</sup>, MENG Xiaying<sup>1</sup>

(1. National Key Laboratory of Scattering and Radiation, Shanghai 200438, China;

2. Beijing Institute of Tracking and Telecommunications  
Technology, Beijing 100094, China)

**Abstract:** For the simulation requirements of space-based infrared detection images, a missile radiation simulation model was developed based on the governing equations of missile internal and external flow field and the radiation calculation equation. An earth surface background radiation simulation model was developed based on the GlobCover and the random fractal algorithm. A coupling simulation method of entrance pupil radiaiton in satelite camera was proposed based on rigorous imaging geometric model. In addition, a simulation method of space-based infrared detection images for moving targets in complex earth surface background was proposed, coupling the models of optical system, detector and signal processing in the imaging link of detection system. The simulation results reveal that based on the data of satellite orbit and missile trajectory, the proposed method can be applied to achieve the continuous imaging simulation of the missile in the boosting phase.

收稿日期: 2023-01-09

基金项目: 基础加强计划技术领域基金(2021-JCJQ-JJ-1295); 国家自然科学基金企业创新发展联合基金(U22B2045)

作者简介: 刘健(1989—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事天基光学探测仿真技术研究。

**Key words:** infrared image; space-based detection; earth surface background; missile radiation

## 0 引言

天基红外探测卫星通过搭载红外传感器,探测弹道导弹主动段辐射能量,能在早期发现导弹目标。天基红外探测具有探测距离远、覆盖范围广等优点,且不受国界限制,已成为世界主要军事强国实现弹道导弹早期探测的主要途径<sup>[1]</sup>。由于天基探测场景下目标和背景辐射特性差异较大,且随时间、空间、光谱变化,通过实际观测或实验模拟很难得到不同时空、不同观测角度、不同谱段的红外探测图像<sup>[2]</sup>。因此,开展复杂背景下运动目标天基红外探测图像仿真方法研究,通过仿真手段获取全要素的天基红外探测图像,可以为天基探测系统论证和载荷优化设计提供基本依据。

针对复杂地表背景下运动目标天基红外探测图像仿真方法,国内外学者已开展了大量研究。美国林肯实验室开发的光谱辐射系统性能仿真与分析(forecasting and analysis of spectroradiometric system performance, FASSP)软件集成了大气传输模型、传感器模型和光学分析模型等,具备可见光波段到长波红外波段的遥感图像仿真能力<sup>[3]</sup>。美国热分析公司通过对已有软件进行集成改进,为美国陆军开发了 MuSES 软件。MuSES 软件具备热计算、辐射计算、超光谱红外计算、烟羽辐射计算和海洋表面模拟等能力<sup>[4]</sup>。赵云峰等<sup>[5]</sup>基于 Pierson-Moskowitz 海洋谱模型模拟海面起伏,通过构建天基探测场景的几何模型,实现了海背景下运动目标的辐射亮度图像仿真。鹿明明等<sup>[6]</sup>基于卫星云图,综合考虑云层自身辐射、反射和散射特性,仿真得到了不同条件下的天基红外云图。董柏序<sup>[7]</sup>基于遥感实测数据,采用工程化计算模型仿真得到相机入瞳处的场景辐射亮度,采用调制传递函数与噪声模型描述成像链路的影响,仿真生成了天基红外背景图像。

虽然目前关于天基红外探测图像仿真方法的

研究较多,但缺乏综合考虑目标、背景和平台影响的统一仿真方法。本文在导弹目标和地表背景的辐射仿真模型基础上,基于严密成像几何模型确定场景耦合辐射特性,进一步叠加探测系统成像仿真模型,提出一种复杂地表背景下的运动目标天基红外探测图像仿真方法,并基于 Matlab 平台开发探测图像仿真系统,仿真生成红外探测图像序列。

## 1 场景辐射特性仿真

### 1.1 天基探测场景中的坐标系转换

天基探测场景涉及卫星、地球、导弹目标、大气、云层、太阳等多个要素。天基红外探测图像仿真首先需要考虑导弹目标、地球和卫星平台等多个坐标系的转换关系。图 1 给出了天基探测场景中的多个坐标系的示意图。本文以地心地固坐标系(earth-centered earth-fixed, ECEF)为基准,将导弹弹道坐标系( $x_m, y_m, z_m$ )、卫星轨道坐标系( $e, p, h$ )和卫星本体坐标系( $x_s, y_s, z_s$ )下的坐标进行转换,统一在地心地固坐标系( $x_{ECEF}, y_{ECEF}, z_{ECEF}$ )下进行处理。

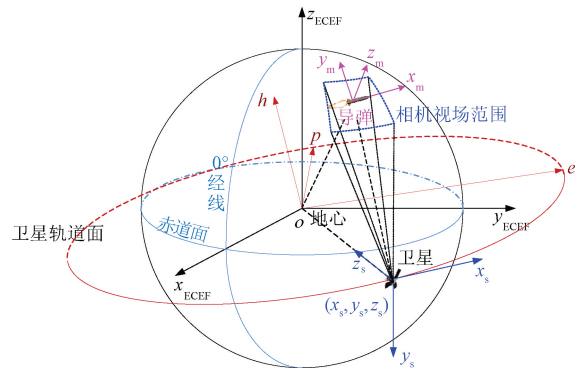


图 1 天基探测场景中的坐标系示意图

地心地固坐标系是以地心  $o$  为原点建立的直角坐标系,  $x_{ECEF}$  轴位于赤道平面内并指向  $0^\circ$  经线,  $z_{ECEF}$  轴与地球自转轴重合并指向北极,  $y_{ECEF}$  轴由右手法则确定。

导弹弹道坐标系以导弹质心为原点,  $x_m$  轴指向导弹速度方向,  $y_m$  轴位于导弹速度矢量铅垂面内, 与  $x_m$  轴垂直并指向天空,  $z_m$  轴由右手法则确定。在导弹弹道坐标系中, 导弹弹体的姿态可以用 3 个欧拉角描述。假设导弹目标相对地心地固坐标系的滚转角为  $\psi$ , 俯仰角为  $\theta$ , 偏航角为  $\varphi$ , 则导弹弹道坐标系下的导弹任意位置的空间坐标  $\mathbf{x}_m$  可以转换为地心地固坐标系下的坐标  $\mathbf{x}_{ECEF,m}$ , 转换方程为

$$\mathbf{x}_{ECEF,m} = \mathbf{R}(\varphi)\mathbf{R}(\theta)\mathbf{R}(\psi)\mathbf{x}_m + \mathbf{x}_{ECEF,m_0} \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{x}_{ECEF,m_0}$  为导弹弹道坐标系原点在在地心地固坐标系下的坐标;  $\mathbf{R}(\varphi)$ ,  $\mathbf{R}(\theta)$ ,  $\mathbf{R}(\psi)$  为地心地固坐标系 3 个坐标轴的旋转矩阵。  $\mathbf{R}(\varphi)$ ,  $\mathbf{R}(\theta)$ ,  $\mathbf{R}(\psi)$  满足

$$\mathbf{R}(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & \sin \varphi & 0 \\ -\sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{R}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\mathbf{R}(\psi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \psi & \sin \psi \\ 0 & -\sin \psi & \cos \psi \end{bmatrix} \quad (4)$$

卫星轨道坐标系以地心为原点, 3 个坐标轴方向分别为偏心矢量方向、正半焦弦方向和轨道面法线方向。卫星轨道坐标系和地心地固坐标系间存在转换关系

$$\mathbf{e} = \begin{bmatrix} \cos \Omega \cos \omega - \sin \Omega \sin \omega \sin \phi \\ \sin \Omega \cos \omega + \cos \Omega \sin \omega \cos \phi \\ \sin \omega \sin \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{ECEF} \\ \mathbf{j}_{ECEF} \\ \mathbf{k}_{ECEF} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} -\cos \Omega \sin \omega - \sin \Omega \cos \omega \cos \phi \\ -\sin \Omega \sin \omega + \cos \Omega \cos \omega \cos \phi \\ \cos \omega \sin \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{ECEF} \\ \mathbf{j}_{ECEF} \\ \mathbf{k}_{ECEF} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中:  $\mathbf{e}$  和  $\mathbf{p}$  分别为卫星轨道坐标系下的偏心矢量方向的单位矢量和正半焦弦方向的单位矢量;  $\mathbf{i}_{ECEF}$ ,  $\mathbf{j}_{ECEF}$ ,  $\mathbf{k}_{ECEF}$  分别为地心地固坐标系 3 个坐标轴的单位矢量;  $\Omega$  为卫星轨道的升交点经度;  $\omega$  为卫星轨道的近心点角距;  $\phi$  为卫星的轨道倾角。

卫星本体坐标系以卫星为原点,  $x_s$  轴指向卫星速度方向,  $z_s$  轴指向地心,  $y_s$  轴方向由右手法则确定。光学探测卫星通常在地球同步轨道上运行, 在地球同步轨道卫星的本体坐标系下, 其任意位置的空间坐标  $\mathbf{x}_s$  可以转换为地心地固坐标系下的坐标  $\mathbf{x}_{ECEF,s}$ , 转换方程<sup>[8]</sup>为

$$\mathbf{x}_{ECEF,s} = \begin{bmatrix} \cos \omega & \sin \omega & 0 \\ -\sin \omega & \cos \omega & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \frac{\pi}{2} & \sin \frac{\pi}{2} \\ 0 & -\sin \frac{\pi}{2} & \cos \frac{\pi}{2} \end{bmatrix} \mathbf{x}_s + \mathbf{x}_{ECEF,s_0} \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{x}_{ECEF,s_0}$  为卫星本体坐标系原点在在地心地固坐标系下的坐标。

## 1.2 导弹目标辐射仿真

导弹辐射主要由弹体辐射和羽流辐射组成, 其中弹体辐射为灰体辐射, 羽流辐射为参与性介质辐射<sup>[9]</sup>。导弹辐射特性仿真包括内外流场数值模拟和红外辐射计算两个部分。导弹羽流流动可以用三维定常可压缩的纳维-斯托克斯(Navier-Stokes, N-S)方程描述。N-S 方程在笛卡尔坐标系下以张量形式表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho U_i}{\partial x_i} = 0 \\ \frac{\partial \rho U_i U_j}{\partial x_i} = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \mu \left( \frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho u_i u_j} \right) \\ \frac{\partial \rho U_i T}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( \Gamma \frac{\partial T}{\partial x_i} - \overline{\rho u_i \tau} \right) - \frac{1}{C_p} \nabla \cdot \mathbf{q}_R \\ i, j = 1, 2, 3 \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $\rho$  为流体密度;  $U_i, U_j$  为流体速度;  $x_i, x_j$  为空间坐标;  $P$  为流体压力;  $\mu$  为流体的动力黏性系数;  $-\overline{\rho u_i u_j}$ ,  $-\overline{\rho u_i \tau}$  为雷诺应力项, 其中  $u_i, u_j$  为湍流的脉动速度,  $\tau$  为湍流的脉动温度;  $T$  为流体温度;  $\Gamma$  为流体热扩散系数;  $C_p$  为流体定压比热容;  $\nabla \cdot \mathbf{q}_R$  为辐射热源梯度, 其中  $\nabla$  为哈密顿算子,  $q_R$  为辐射热源项。

由于导弹羽流中存在多种参与性燃烧组分, 需要引入组分传输方程描述气体和粒子的扩散过程。组分传输方程在笛卡尔坐标系下以张量形式表示为

$$\frac{\partial \rho U_i Y_k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left( D_k \frac{\partial Y_k}{\partial x_i} - \overline{\rho u_i y_k} \right) \quad (9)$$

式中:  $Y_k$  为  $k$  组分的质量浓度;  $D_k$  为  $k$  组分的质量扩散系数;  $-\overline{\rho u_i y_k}$  为流场中的湍流扩散项, 其中  $y_k$  为  $k$  组分的脉动质量浓度。

在获取导弹流场数值模拟结果的基础上, 进一步求解光谱辐射传输方程, 得到光谱辐射亮度, 进而计算得到导弹目标光谱辐射强度。红外辐射计算涉及的控制方程包括光谱辐射传输方程、光谱辐射照度计算方程和光谱辐射强度计算方程, 分别为

$$\frac{dL_\lambda(S)}{dS} = -\alpha_\lambda L_\lambda(S) + \alpha_\lambda L_{\lambda,b}(S) - \sigma_\lambda(S) L_\lambda(S) + \frac{\sigma_\lambda(S)}{4\pi} \int_{\Omega_i=4\pi} L_\lambda(S, \omega_i) \Phi_\lambda(\omega_i) d\omega_i \quad (10)$$

$$H_\lambda = \int_{\Omega_i} L_\lambda(S, \omega_i) \cos \beta_{\omega_i} d\omega_i \quad (11)$$

$$I_\lambda = H_\lambda R^2 / \tau_{\lambda, \text{atm}} \quad (12)$$

式中:  $L_\lambda(\cdot)$  为光谱辐射亮度, 其中  $\lambda$  为工作波长;  $S$  为辐射传输距离;  $\alpha_\lambda$  为光谱吸收系数;  $L_{\lambda,b}(\cdot)$  为黑体的光谱辐射亮度;  $\sigma_\lambda(\cdot)$  为光谱散射系数;  $\omega_i$  为入射立体角;  $\Phi_\lambda(\cdot)$  为散射相函数;  $\Omega_i$  为入射立体角的积分区间;  $H_\lambda$  为光谱辐射照度;  $\beta_{\omega_i}$  为入射立体角  $\omega_i$  的入射方向和微元面法向的夹角;  $I_\lambda$  为光谱辐射强度;  $R$  为探测距离;  $\tau_{\lambda, \text{atm}}$  为大气光谱透过率。

本文首先构建导弹弹体和排气系统三维几何模型, 利用商用计算流体力学软件 Fluent 实现导弹流场数值模拟; 然后基于流场数值模拟结果, 采用自主开发的红外辐射特性计算软件 SAST-IR 实现导弹特定角度下的积分辐射强度计算。

### 1.3 复杂地表背景辐射仿真

天基探测场景中包含地表下垫面、太阳和云层等多种背景, 仿真红外探测图像时必须加以考虑。欧洲航天局 (ESA) 地表类型数据库 GlobCover 2009<sup>[10]</sup> 包含了水生植被、雨后农田、阔叶常绿林、阔叶落叶林、针叶常绿林、针叶落叶林、混交植被、草地、稀疏植被、城市 (人造地表)、裸露土、水体、永久性冰雪等 23 种地表类型在不同波段的辐射/反射特性, 空间分辨率达  $1'$ 。图 2 为该数据库中全球地表的可见光图像。

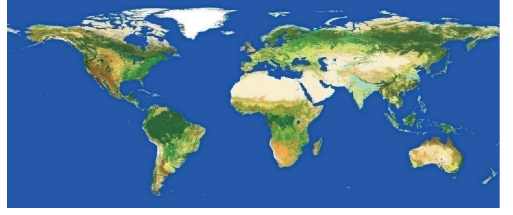


图 2 地表类型数据库 GlobCover 2009 的可见光图像

已知经纬度坐标信息, 可以在数据库中检索出该坐标位置处的地表类型及辐射/反射特性数据。根据地表温度和地表辐射/反射特性数据, 采用普朗克定律可以计算出当地的地表辐射特性参数。

太阳辐射投射到目标和背景表面时, 目标和背景会反射太阳辐射, 进而影响目标和背景的表现辐射特性。太阳辐射对目标和背景的影响主要体现在不同经纬度位置处的太阳辐射照度上, 而太阳辐射照度由太阳高度角和太阳方位角决定。太阳高度角  $\phi_s$  和太阳方位角  $\theta_s$  的计算公式为

$$\phi_s = \arcsin(\sin \eta \sin \delta + \cos \eta \cos \chi) \quad (13)$$

$$\theta_s = \begin{cases} \arccos(\sin \delta - \sin \phi_s \sin \chi), & \chi \leq 0 \\ 2\pi - \arccos(\sin \delta - \sin \phi_s \sin \chi), & \chi > 0 \end{cases} \quad (14)$$

其中

$$\delta = 23.45 \sin(2\pi(284 + N_{\text{day}})/365) \quad (15)$$

$$\chi = 15[t_{\text{LS}} + (\gamma - 120)/15 - 12] \quad (16)$$

式中:  $\eta$  为当地纬度;  $\gamma$  为当地经度;  $\delta$  为太阳赤纬角;  $\chi$  为太阳时角;  $N_{\text{day}}$  为当年天数;  $t_{\text{LS}}$  为当地平太阳时。

云层是天基探测场景中的重要背景, 其辐射强度甚至与目标辐射强度相当。云层辐射亮度分布呈现随机性, 可以采用分形理论生成探测场景中的云层辐射亮度图像。本文采用文献<sup>[11]</sup>的云层辐射亮度随机分形算法, 参考多尺度叠加分形算法, 在分形布朗运动的基础上构建一种随机函数, 并与 Mandelbert-Weierstrass 函数结合, 计算云层辐射亮度。该算法的核心思想是构造一个随机分形函数, 该函数在任意空间位置的分形数值由随机矩阵插值叠加得到。随机分形函数  $V$  的表达式为

$$V(\mathbf{X}) = \sum_{\xi=\xi_0}^{\xi_{\max}} \frac{1}{r^{\xi w}} B_n \left( r^\xi \frac{\mathbf{X}}{l} \right) \quad (17)$$

式中:  $\mathbf{X}$  为位置矢量;  $\xi$  为空间频率;  $\xi_0$  和  $\xi_{\max}$  分

别为空间频率的最小值和最大值; $r$ 为空隙系数; $W$ 为累加权重; $B_n(\cdot)$ 为高斯随机分布矩阵在 $\mathbf{X}$ 处的插值函数; $l$ 为插值分辨率。

#### 1.4 探测场景辐射耦合

星载相机接收到的入瞳辐射包括目标辐射、地表自身辐射、云层自身辐射、地表和云层反射的太阳辐射以及大气程辐射。地表、云层和目标在空间中存在一定的遮挡关系,同时目标和背景辐射又受到沿程大气的衰减作用。因此,必须在统一的坐标系下,基于相机严密成像几何模型,确定辐射传输路径中的影响因素,耦合目标和背景辐射。图3给出了卫星本体坐标系下的星载相机成像几何示意图。其中, $\theta_{fov,x}$ 和 $\theta_{fov,y}$ 为卫星本体坐标系下的相机视场角, $ox_0y_0$ 为成像平面的二维坐标系, $i$ 和 $j$ 分别为成像平面中任意像元的行序号和列序号。

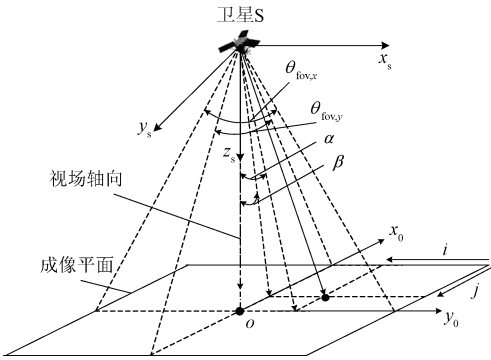


图3 星载相机成像几何示意图

在卫星本体坐标系下,相机成像平面中任意像元( $i_c, j_c$ )的视线指向矢量可以表示为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{i}_{ECEF} \\ \mathbf{j}_{ECEF} \\ \mathbf{k}_{ECEF} \end{bmatrix} = \mathbf{r} \cdot \begin{bmatrix} -\tan(\theta_{fov,y} - i_c \theta_{ifov}) \\ \tan(\theta_{fov,x} - j_c \theta_{ifov}) \\ 1 \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中: $\mathbf{r}$ 为相机成像平面中像元( $i_c, j_c$ )的视线指向在卫星本体坐标系下的单位矢量; $\theta_{ifov}$ 为相机瞬时视场角。

利用转换矩阵,可以将上述视线矢量由卫星本体坐标系转换到地心地固坐标系。进一步根据地球表面方程,求解视线矢量与地表交点坐标,并根据交点坐标确定地表类型,即可计算得到地表背景辐射。

对于视场中没有目标的区域,任意像元接收

到的场景辐射强度

$$I_{ep} = (I_{earth} \tau_{cloud} + I_{cloud}) \tau_{atm} + I_{atm} \quad (19)$$

式中: $I_{earth}$ 为地表辐射强度,包括地表自身辐射强度和反射太阳辐射强度; $I_{cloud}$ 为云层辐射强度,包括云层自身辐射强度和反射太阳辐射强度; $I_{atm}$ 为大气程辐射强度; $\tau_{cloud}$ 为云层透过率; $\tau_{atm}$ 为沿程大气透过率。大气程辐射强度和沿程大气透过率可以通过调用Modtran软件计算得到。

而对于视场中存在目标的区域,任意像元接收到的场景辐射强度

$$I_{ep} = \begin{cases} (I_{tar} \tau_{cloud} + I_{cloud}) \tau_{atm} + I_{atm}, & \text{目标在云下} \\ (I_{tar} + I_{cloud}) \tau_{atm} + I_{atm}, & \text{目标在云上} \end{cases} \quad (20)$$

式中: $I_{tar}$ 为导弹目标的辐射强度。

## 2 光学探测系统成像仿真

### 2.1 光学系统仿真

光学系统由各种光学元器件组成。由于光学系统存在衍射、像差、制造缺陷和装配误差,这导致辐射能量经过光学系统时会有一定的扩散和衰减。在进行光学系统仿真时,通过构建调制传递函数来描述光学系统的衍射、像差和离焦。

光学系统的衍射效应本质是光在遇到障碍物时发生扩散或者弯曲,使得无限小的光源经过光学系统后成的像不再是无限小的点,而是一个扩散的光斑。在没有像差的光学系统中,衍射极限决定了光学系统的最高空间分辨率。衍射效应可以用衍射传递函数 $F_{diff}(x)$ 描述为

$$F_{diff}(x) = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left( \frac{\xi_x}{\xi_{oc}} \right) - \frac{\xi_x}{\xi_{oc}} \sqrt{1 - \left( \frac{\xi_x}{\xi_{oc}} \right)^2} \quad (21)$$

式中: $x$ 为像高或像宽方向的坐标; $\xi_x$ 为像元空间频率; $\xi_{oc}$ 为光学系统空间截止频率。

像差用于描述光学系统成像的缺陷,表现为实际成像效果与理想成像效果之间的偏差。当像元空间频率小于光学系统截止频率时,像差传递函数 $F_{abe}(x)$ 可以表示为

$$F_{abe}(x) = 1 - \left( \frac{W_{rms}}{0.18} \right)^2 \left[ 1 - 4 \left( \frac{\xi_x}{\xi_{oc}} - \frac{1}{2} \right)^2 \right] \quad (22)$$

式中: $W_{rms}$ 为波前像差均方根。

光学系统周围环境的温度变化会导致光学系统内部结构发生变化,进而引起像面位置变化,导

致离焦。此外,探测平台侧摆或者轨道摄动也会引起物面位置变化,从而导致离焦。光学系统的离焦传递函数

$$F_{\text{def}}(x) = 2J_1\left(\frac{\pi\xi_N}{F}\right) \bigg/ \left(\frac{\pi\xi_N\Delta\kappa_x}{F}\right) \quad (23)$$

式中:  $J_1(\cdot)$  为一阶贝塞尔函数;  $\xi_N$  为奈奎斯特频率;  $\Delta\kappa_x$  为  $x$  位置处的离焦量;  $F$  为光学系统的光圈数( $F$  数)。

经过光学系统处理的辐射图像可以由入瞳辐射图像点乘光学系统模型的调制传递函数得到,即

$$R_{\text{lens}} = R_{\text{ep}} \cdot F_{\text{diff}}(x) \cdot F_{\text{abe}}(x) \cdot F_{\text{def}}(x) \quad (24)$$

式中:  $R_{\text{lens}}$  为经过光学系统处理的辐射图像;  $R_{\text{ep}}$  为入瞳辐射图像。

## 2.2 探测器光电转换仿真

探测器焦平面接收外界辐射能量产生电荷,当光生电荷到达势阱中时,系统会从其所在的探测像元位置将其转移或读出。在探测器工作波段范围内,一个像元对入射能量响应产生的电子数  $E_{\text{ele}}$  可以表示为

$$E_{\text{ele}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\pi A_D \tau_0}{4F^2} (1 - \epsilon) \frac{\lambda}{hc} t_{\text{int}} L_{\lambda} \nu_{\lambda} d\lambda \quad (25)$$

式中:  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  为探测器工作波段的起始和终止波长;  $A_D$  为单个像元的面积;  $\tau_0$  为光学系统的透过率;  $\epsilon$  为面遮挡因子;  $h$  为普朗克常数;  $c$  为光速;  $t_{\text{int}}$  为积分时间;  $L_{\lambda}$  为入瞳光谱辐射亮度;  $\nu_{\lambda}$  为探测器的量子效率。

## 2.3 系统噪声仿真

探测系统噪声模型主要考虑散粒噪声和系统暗噪声两类。这两类噪声均呈现高斯分布,可以通过高斯分布函数生成。散粒噪声  $\sigma_{\text{sl}}$  和系统暗噪声  $\sigma_{\text{dark}}$  的计算公式为

$$\sigma_{\text{sl}} = N(0, \nu_{\lambda} \sqrt{E_{\text{ele}}}, m_1, n_1) \quad (26)$$

$$\sigma_{\text{dark}} = N(0, E_{\text{d}}, m_1, n_1) \quad (27)$$

式中:  $N(\cdot)$  为正态分布函数;  $m_1$  和  $n_1$  分别为图像的行数和列数;  $E_{\text{d}}$  为系统暗电流电子数。

## 2.4 图像量化仿真

天基探测场景中的目标和背景辐射能量是连续变化的。数字图像没有足够的范围表示连

续变化量,因此需要将连续变化量离散化,得到数字图像,这一过程就是量化。量化过程可以描述为

$$D = \begin{cases} 0, & E_{\text{ele}} \leq E_{\text{min}} \\ \text{int}\left(\frac{(E_{\text{ele}} - E_{\text{min}})(2^n - 1)}{E_{\text{max}}}\right), & E_{\text{min}} < E_{\text{ele}} < E_{\text{max}} \\ 2^n - 1, & E_{\text{ele}} \geq E_{\text{max}} \end{cases} \quad (28)$$

式中:  $D$  为图像灰度值;  $E_{\text{min}}$ ,  $E_{\text{max}}$  分别为系统设置的图像量化电子数下限阈值和上限阈值;  $\text{int}(\cdot)$  为取整函数;  $n$  为有效量化位数。

## 3 典型仿真案例及仿真结果分析

### 3.1 仿真输入

综合上述建模过程,基于 Matlab 平台开发了复杂地表背景下运动目标天基红外探测图像仿真系统。针对典型卫星和导弹运动目标设计仿真实验,开展天基红外探测仿真案例分析。

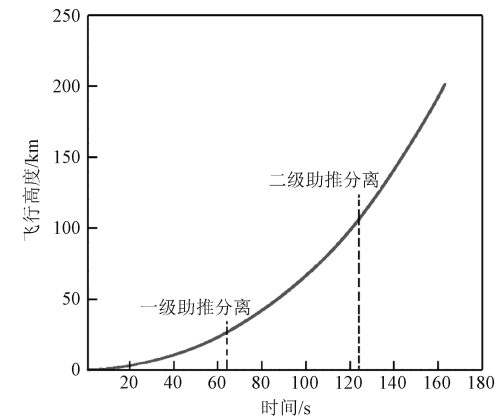
假定卫星为地球同步轨道卫星,定位于东经  $80^\circ$ ; 星载相机为凝视相机,相机光轴指向东经  $75^\circ$ 、北纬  $10^\circ$ 。相机相关参数如表 1 所示。

表 1 仿真实验中的星载凝视相机参数

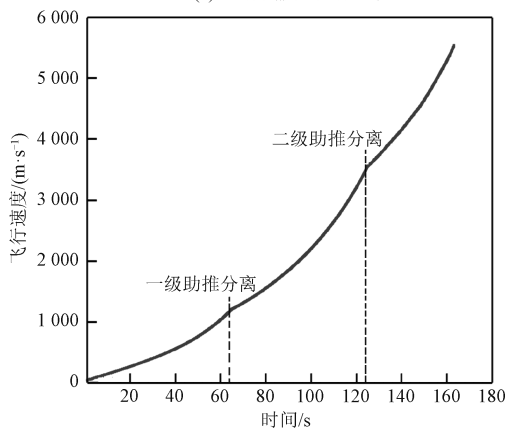
参数	参数值
工作波段/ $\mu\text{m}$	3.5~4.8
分辨率/像素	512×512
瞬时视场角/ $\mu\text{rad}$	30
$F$ 数	20
波前像差均方根	0.02
离焦量/mm	0.001
光学系统透过率	0.95
面遮挡因子	0.01
积分时间/s	0.01
平均量子效率	0.28
系统暗电流电子数	1 000

假定目标为三级弹道导弹,于 6 月 1 日 0 时 0 分 0 秒(世界时)从东经  $75^\circ$ 、北纬  $10^\circ$  发射,射向为  $60^\circ$ 。其主动段弹道如图 4 所示。由图 4(a) 所示的飞行高度-时间曲线可知,导弹飞行高度随时

间连续变化,无法根据导弹飞行高度来判断一级助推分离和二级助推分离时刻。由图 4(b)所示飞行速度-时间曲线可知,导弹飞行速度随时间的变化率(加速度)在助推分离时刻出现突变,可以依据导弹飞行速度的变化来判断助推分离时刻。



(a) 飞行高度-时间曲线



(b) 飞行速度-时间曲线

图 4 导弹主动段弹道

根据导弹模型和弹道数据,结合发动机工况参数,通过调用商用计算流体力学软件 Fluent 完成导弹流场数值模拟,通过调用自主开发的红外辐射特性计算软件 SAST-IR 完成导弹特定角度下的积分辐射强度计算。图 5 给出了该导弹在主动段飞行过程中, $(3.5 \sim 4.8) \mu\text{m}$  波段内的侧向积分辐射强度曲线。

### 3.2 仿真结果分析

图 6 给出了发射后 60 s 时刻天基探测场景的入瞳辐射强度分布。可以看出,由于导弹目标及其羽流特征尺寸小于探测视场的场景分辨率,因此目标在图像中仅占据一个像元大小(已在视场中央用方框标记)。视场中少部分区域存在高

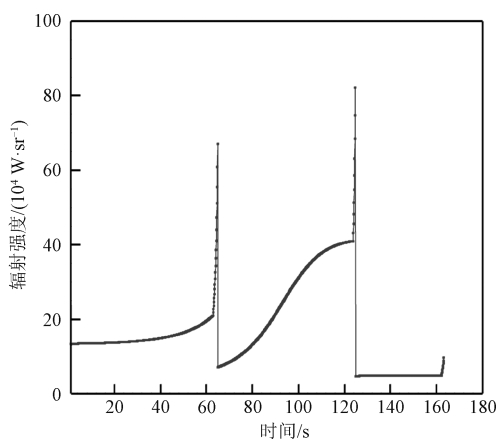


图 5 导弹目标主动段全程中波侧向积分辐射强度

空卷云,高空卷云的辐射强度与目标辐射强度相当;视场中绝大部分区域受云层影响较小,可以通过地表辐射强度分辨出陆地和海洋轮廓。

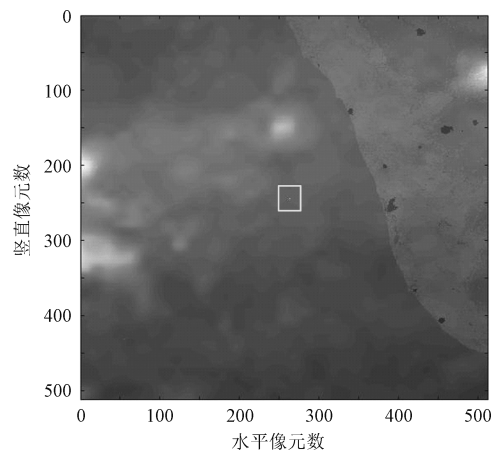


图 6 发射后 60 s 时刻天基探测场景的入瞳辐射强度

图 7 给出了导弹目标在整个主动段内不同时刻的探测图像。分析探测图像序列可以发现,在主动段初期(0 s 时刻),由于导弹目标自身辐射较弱,且导弹目标飞行高度低,目标辐射受大气和云层衰减严重,难以从探测图像中检测到目标。随着飞行高度不断增加,目标辐射不断增强,同时大气衰减也逐渐减弱,目标在探测图像中逐渐增强,并在一级和二级主动段分离前后表现出辐射强度突增的现象(60 s 和 120 s 时刻)。由于导弹自身辐射较弱,第三级主动段在探测图像中不显著(165 s 时刻)。由于光学系统的扩散效应,目标轮廓在探测图像中出现了膨胀,占据了多个像元,且随着表观辐射强度的增加,占据像元数不断增加。上述变化规律与导弹目标天基实测图像中的

变化规律基本吻合。可以根据多帧连续探测图像中目标在像平面的位移,进行目标检测和跟踪模拟。

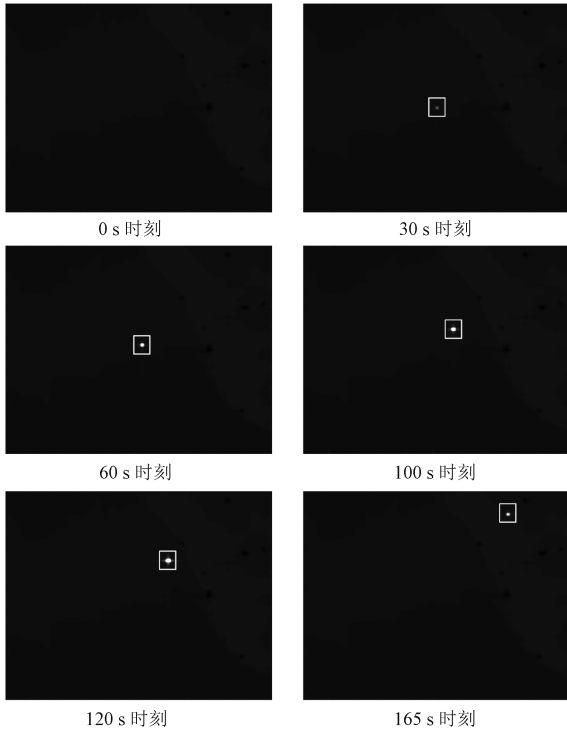


图 7 不同时刻的天基红外探测图像仿真结果

## 4 结论

通过构建弹道导弹辐射仿真模型、复杂地表背景辐射仿真模型、严密成像几何模型和探测系统成像仿真模型,提出了一种复杂地表背景下运动目标天基红外探测图像仿真方法。通过开展典型仿真实验,分析天基红外探测图像仿真结果,可以得到以下结论。

由于导弹目标自身辐射较弱,且大气衰减严重,又可能受到云层的遮挡,天基探测系统难以在主动段初期实现对弹道导弹目标的有效探测。

虽然导弹目标的特征尺寸小于探测视场的场景分辨率,但由于星载相机光学系统的扩散效应,导弹目标在探测图像中往往占据多个像元,形成亮斑团簇。

本文所提方法可以用于仿真生成天基红外探测图像序列,该图像序列可作为天基光学载荷优化设计的仿真输入。因此本文所提方法对天基红外探测系统论证设计具有重要意义。

## 参考文献

- [1] 王云萍. 美国天基红外导弹预警技术分析[J]. 光电技术应用, 2019, 34(3): 1-7.
- [2] 谷雨. 地球同步轨道红外预警卫星仿真模型研究[J]. 电子科技, 2012, 25(8): 80-85.
- [3] IENTILUCCI E J. Oblique hyperspectral radiometric phenomenology study[C]// Image and Signal Processing for Remote Sensing XV, Berlin. Bellingham: SPIE, 2009: 7477.
- [4] CURRAN A R, GONDA T G. Applications of the MuSES infrared signature code[R]. Calimet, MI: ThermoAnalytics Incorporated, 2005.
- [5] 赵云峰, 李夜金, 张寅, 等. 海洋背景下运动目标的天基红外探测场景生成系统[J]. 光学精密工程, 2017, 25(4): 487-493.
- [6] 鹿明明, 谭毅华, 魏浩洋, 等. 天基红外云层背景的仿真研究[J]. 计算机与数字工程, 2014, 42(4): 685-690.
- [7] 董柏序. 天基红外背景成像建模与验证[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
- [8] VALLADO D A. Fundamentals of astrodynamics and applications[M]. 4th ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2013.
- [9] 张小英, 向红军, 朱定强. 固体火箭发动机地面和飞行过程中羽流红外辐射的计算研究[J]. 红外技术, 2016, 38(1): 81-87.
- [10] European Space Agency. GlobCover 2009 [DB/OL]. (2010-12-21) [2023-01-09]. [http://due.esrin.esa.int/files/Globcover2009\\_V2.3\\_Global\\_.zip](http://due.esrin.esa.int/files/Globcover2009_V2.3_Global_.zip).
- [11] SAUPE D. Point evaluation of multi-variable random fractals[M]// JÜRGENS H, SAUPE D. Visualisierung in mathematik und naturwissenschaften: bermer computergraphik-tage 1988. Heidelberg: Springer Berlin, 1989: 114-126.