

天基空间目标红外动态辐射特性建模与仿真

汪洪源¹, 陈 贇²

(1. 哈尔滨工业大学 空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 上海航天控制技术研究所, 上海 200335)

摘要: 提出了一种空间目标红外动态辐射特性的建模方法。目标红外辐射包括自身发射辐射和对背景的反射辐射。根据目标与背景特征建立了空间目标辐射特性的物理模型。基于表面材料属性对目标表面进行区域与面元划分, 根据能量守恒定律, 利用目标在宇宙空间的热平衡方程建立了空间目标自身红外辐射特性的数学模型。同时, 引入双向反射分布函数模型描述目标表面面元的反射特性, 将目标所有面元反射分量叠加建立了目标红外反射特性的数学模型。最后, 构建目标本体坐标系, 通过坐标变换确定目标、背景辐射源与探测器的相对位置关系。根据给定的轨道参数、目标几何尺寸和表面物性参数仿真获得空间目标在轨红外特性。计算结果验证了模型的有效性, 为空间目标的红外探测与识别提供参考数据。

关键词: 建模; 空间目标; 红外动态辐射; 双向反射分布函数; 空间光学

中图分类号: O432.1; O434.11 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0504002

Modeling and simulation of infrared dynamic characteristics of space-based space targets

Wang Hongyuan¹, Chen Yun²

(1. Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Shanghai Institute of Spaceflight Control Technology, Shanghai 200335, China)

Abstract: A modeling method of infrared dynamic radiation characteristics of the space target was presented. Infrared radiation of the target consists of self-emitted infrared radiation and reflected background infrared radiation. A physical model of radiation characteristics of the space target was established according to target and background characteristics. The target surface was divided into regions and grids based on material properties. According to thermal equilibrium equation of outer space target, a mathematical model on infrared radiation characteristics of the space target was presented based on conservation of energy principle. Bidirectional Reflection Distribution Function (BRDF) was introduced to describe infrared reflection characteristics of the target surface element, and a mathematical model on infrared reflection characteristics of the target was built by superimposing all the reflection components of surface elements. Finally, a body coordinate system was set and the relative positions of the target, the background radiation sources and the detector were determined in terms of coordinate conversion.

收稿日期: 2015-12-31; 修订日期: 2016-01-20

基金项目: 航天支撑基金(JZ20140151); 中央高校基本科研业务费专项资金(HIT.NSRIF.2014042)

作者简介: 汪洪源(1975-), 男, 副教授, 博士, 主要从事光学成像系统建模、仿真、测试与评估方面的研究。Email: fountainhy@hit.edu.cn

Simulation of the target infrared characteristics in orbit was achieved according to its given orbital parameters, physical dimension and physical parameter of the target. The calculations show the model is valid and it can provide reference data to visible detection and recognition of space targets.

Key words: modeling; space target; infrared dynamic radiation; BRDF; space optics

0 引言

随着航天事业的发展,发射进入太空的空间目标的数量不断增多,根据 UCS Satellite Database 公布的数据,目前在轨运行的空间卫星为 1 235 颗,其中美国有 512 颗,俄罗斯有 135 颗,中国有 116 颗,其他国家为 472 颗^[1]。加上废弃的火箭体以及空间碎片等,在轨的空间目标共计 30 000 个左右。废弃的火箭体、失效卫星以及空间碎片等不仅占据了宝贵的地球轨道资源,而且严重影响了空间卫星的运行安全。据 ESA 预测,若不采取有效的措施清除轨道垃圾,到 2030 年左右,将有 3.7% 的碰撞概率,即每 25 颗正常卫星中将会有一颗与不受控物体相碰。如何编目管理正常运行的空间目标,有效清理失效的空间目标,已成为各国面临的主要任务。空间目标红外探测技术具有环境适应性好,抗干扰能力强,且设备体积小、质量轻、功耗低等特点,作为一种比较成熟、有效的手段得到了迅速的发展。红外探测技术主要是利用目标与背景之间的辐射差异实现空间目标的有效获取,空间目标红外辐射特征的动态变化直接影响探测系统的方案设计以及系统探测能力的有效评估,因而需要针对不同类型、不同材质特性、不同运动特性的空间目标进行红外动态辐射特性的建模与仿真分析。

国内外很多学者对目标红外特性进行了研究^[2-9],但大多是基于辐射理论而进行的目标自身红外辐射特性研究,利用双向反射分布函数进行目标红外特性研究的还很少。卫星目标在空间运行,由于自身具有一定温度,会产生发射辐射,同时,受太阳、地球及其他星体辐照的影响,会产生反射辐射。文中的工作主要是根据目标的背景辐射环境,综合考虑目标的自身辐射与反射辐射,引入双向反射分布函数模型分析目标的红外反射特性。双向反射分布函数是描述材料表面散射特性的唯一确定性函数,可以精确表征不同入射与观测角度、不同波长、不同表面粗糙

度的目标表面的反射特征。同时,根据双向反射分布函数计算目标表面材料的发射率,基于目标的形状尺寸、表面温度分析目标自身红外辐射特性,进而利用计算机仿真技术模拟获得所需目标的红外辐射特征。总之,双向反射分布函数是进行目标红外特性研究的重要参量之一,可以有效地描述目标表面的红外辐射特性。

综合考虑目标自身辐射与反射辐射,构建空间目标红外辐射传输链路模型,仿真分析空间目标的红外动态特征,为空间目标探测系统方案设计与指标论证提供重要的技术支撑,对空间目标探测、识别与跟踪技术的发展具有重要的应用价值。

1 双向反射分布函数

1.1 双向反射分布函数概念

双向反射分布函数 (BRDF) 是由美国学者 Nicodemus 最早提出的^[10]。它表示了不同入射角条件下物体表面在任意观测角的反射特性,如图 1 所示。

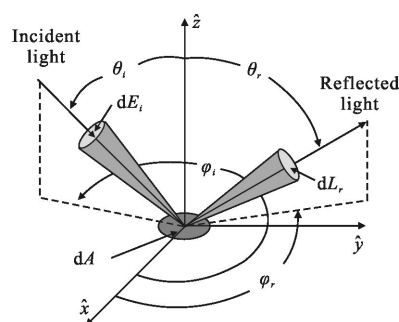


图 1 光反射几何图

Fig.1 Geometry of light reflection

图 2 给出了关于双向反射分布函数可视化的物理描述。双向反射分布函数是描述材料反射特性的重要函数,它是光辐射的反射辐亮度和入射辐照度的比值。其数学表达式为:

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_r, \varphi_r; \theta_i, \varphi_i)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)} \quad (1)$$

式中: θ_i, φ_i 为入射光的入射角和方位角; θ_r, φ_r 为反射

光的反射角和方位角; L_r 为面元 dA 经照射后在 (θ_r, φ_r) 方向上的辐亮度, 单位为 $W/(m^2 \cdot sr \cdot \mu m)$; E_i 为 (θ_i, φ_i) 方向上入射光产生的表面辐照度, 单位为 $W/m^2 \cdot \mu m$ 。则 f_r 的单位为 sr^{-1} 。 f_r 的物理意义是沿着方向 (θ_r, φ_r) 出射的辐亮度与方向 (θ_i, φ_i) 入射在被测表面产生的辐照度之比。

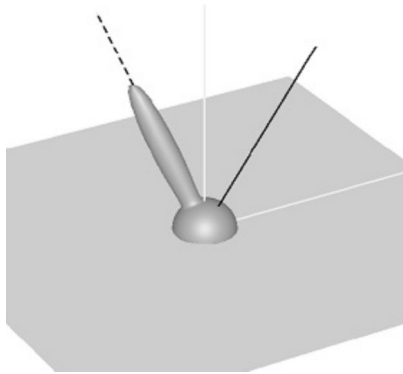


图 2 双向反射分布函数的可视化描述

Fig.2 Visual description of bidirectional reflection distribution function

1.2 双向反射分布函数模型

BRDF 的模型很多, 根据空间目标的表面状况选用 Torrance-Sparrow 模型。该模型假定目标表面由小的随机分布的面元组成, 基于几何光学近似并忽略了电磁波项。同时, 充分考虑了入射天顶角与方位角、反射天顶角与方位角、波长以及粗糙度等因素的综合影响。其适用范围为 $\sigma \cos \theta_i / \lambda > 0.2$ 且 $\sigma / a < 2$, 其中 σ 为目标表面均方根粗糙度, a 为表面自相关长度。双向反射分布函数的表达式为:

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{A}{\cos \theta_r} \cdot \left[\frac{g \rho_{d,s}(\theta_d) G}{\cos \theta_r} \exp(-c^2 \alpha^2) + \cos \theta_i \right] \quad (2)$$

式中: A, c, g 为与入射立体角和面元特性相关的常量; G 为遮蔽函数, 这里取为 1; $\rho_{d,s}(\theta_d)$ 为方向半球反射率。 α, θ_d 与 $\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r$ 存在球面三角关系, 当反射光与入射光在同一平面时 $\alpha = (\theta_r - \theta_i) / 2, \theta_d = (\theta_r + \theta_i) / 2$ 。

2 空间目标红外特性建模

2.1 物理模型

由于空间目标在太空运行, 其红外辐射主要由两部分组成: 自身发射的红外辐射和反射背景辐射的红外辐射。整个目标及目标表面面元的红外背景辐射如图 3、图 4 所示。

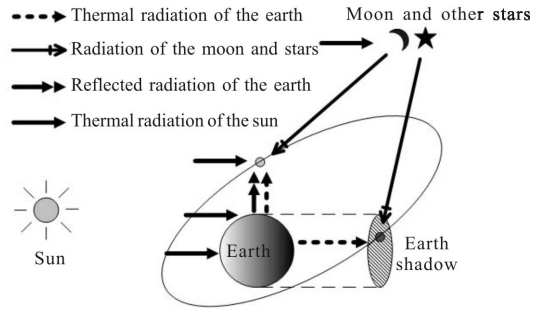


图 3 背景辐射物理模型

Fig.3 Physical model of the background radiation

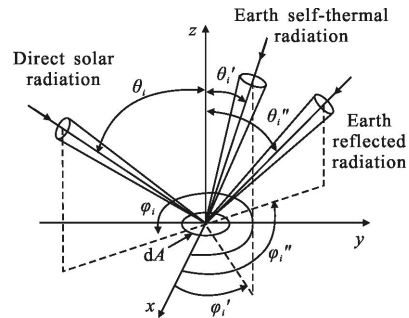


图 4 面元的反射特性

Fig.4 Reflection characteristics of the surface element

2.2 数学模型

2.2.1 背景特性数学模型

2.2.1.1 日照区背景辐射数学模型

当目标位于日照区, 空间目标的红外背景辐射主要由三部分组成: 太阳的直接红外辐射、地球反射的太阳红外辐射和地球自身发射的红外辐射。这里忽略了月亮及其他星体的红外辐射。根据辐射理论, 可以分别计算出各部分背景辐射在目标处的光谱辐照度。

(1) 太阳直接红外辐射在目标处产生的光谱辐照度:

$$E_{\text{sun-IR}}(\lambda) = \frac{\frac{c_1}{\lambda^5} (e^{c_2/\lambda T_s} - 1)^{-1} \cdot R_s^2}{R_{S-E}^2} \quad (3)$$

式中: λ 为波长, μm ; c_1 为第一黑体辐射常数; c_2 为第二黑体辐射常数; T_s 为太阳辐射温度, $T_s = 5900 \text{ K}$; R_s 为太阳半径, $R_s = 6.9599 \times 10^5 \text{ km}$; R_{S-E} 为平均日地距离, $R_{S-E} = 1.4968 \times 10^8 \text{ km}$ 。

(2) 地球反射辐射在目标处产生的光谱辐照度:

$$E_{\text{earth-IR-1}}(\lambda) = \frac{E_{\text{sun-IR}}(\lambda) \cdot \rho \cdot R_E^2}{(R_E + R_{T-E})^2} \quad (4)$$

式中： ρ 为地球的平均反照率， $\rho=0.35$ ； R_E 为地球半径， $R_E=6\ 370\text{ km}$ ； R_{T-E} 为目标到地面距离。

(3) 地球自身红外辐射在目标处产生的光谱辐照度：

$$E_{\text{earth-IR-2}}(\lambda)=\frac{c_1}{\lambda^5}(e^{c_2/\lambda T_E}-1)^{-1}\cdot R_E^2 \quad (5)$$

式中： T_E 为地球表面平均温度， $T_E=280\text{ K}$ ； c_1 、 c_2 、 λ 、 R_E 、 R_{T-E} 与公式(2)、(3)相同。

地球自身红外辐射为地球及其大气系统的整体辐射。地球红外辐射的空间分布可假定为漫发射，即遵循朗伯余弦定律。

2.2.1.2 地影区背景辐射数学模型

当目标位于地影区，空间目标的红外背景辐射主要是地球自身发射的红外辐射，其在目标处产生的光谱辐照度与公式(4)相同。

2.2.2 目标红外反射特性数学模型

根据双向反射分布函数的定义，目标表面的双向反射分布函数(BRDF)可以将入射到目标表面的背景辐照度与目标对背景辐射的反射辐亮度联系起来，进而可以用来分析目标的反射特性。若假定目标表面由若干面元组成，则面元 dA 接收背景红外辐射后产生的辐亮度为：

$$L_p(\lambda, \theta_i)=f_r \cdot E_b(\lambda) \cdot \cos \theta_i \quad (6)$$

式中： f_r 为目标表面面元 dA 的双向反射分布函数， sr^{-1} ； θ_i 为目标表面面元 dA 的法线与背景辐射入射方向的夹角， rad ； $L_p(\lambda, \theta_i)$ 为目标表面面元反射光谱辐亮度， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$ ； $E_b(\lambda)$ 为背景光谱辐照度， $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$ 。

则面元 dA 在 θ_i 方向上产生的光谱辐射强度为：

$$dI_{\theta_i}=L_p(\lambda, \theta_i) \cdot dA=f_r \cdot E_b(\lambda) \cdot \cos \theta_i \cdot dA \quad (7)$$

若目标与探测器之间的距离为 R ，根据距离平方反比定律，则目标表面微面元 dA 反射背景辐射在探测器入瞳处产生的光谱辐照度为：

$$E_{dA}=\frac{dI_{\theta_i}}{R^2}=\frac{f_r \cdot E_b(\lambda) \cdot \cos \theta_i \cdot \cos \theta_r \cdot dA}{R^2} \quad (8)$$

根据上述分析，若目标某一表面 i 对探测器而言为“可视表面”，将该面所有面元的反射分量叠加可得到该面在探测器入瞳处的辐照度，即：

$$E_{\text{ref}}^i=\iint \frac{E_b(\lambda) \cdot f_r \cdot \cos \theta_i \cdot \cos \theta_r}{R^2} d\lambda dA \quad (9)$$

将所有“可视表面”在探测器处的贡献叠加，可得到整个目标在探测器入瞳处产生的辐照度，即：

$$E_{\text{ref}}=\sum_{i=1}^n E_{\text{ref}}^i \quad (10)$$

2.2.3 目标红外辐射特性数学模型

目标运行在深空轨道，处于 3.5 K 的冷背景，如果知道目标的形状尺寸、表面温度，若通过双向反射分布函数测量获得表面材料的红外光谱发射率，就可以确定目标自身发射的红外辐射特性。

2.2.3.1 目标表面温度计算

目标在空间运行，接收到的外来热流有太阳辐射、地球热辐射和地球大气的反照辐射。若不考虑内热源的影响，则目标表面的热平衡方程为：

$$\alpha_1 E_{\text{sun}} A_{\text{ps}}+\alpha_2 E_2\left(\frac{R}{R+h}\right)^2 A_{\text{pe}}+\varepsilon E_3\left(\frac{R}{R+h}\right)^2 A_{\text{pe}}=A \varepsilon \sigma T^4 \quad (11)$$

式中： A_{ps} 为目标对太阳的投影面积， m^2 ； A_{pe} 为目标对地球的投影面积， m^2 ； A 为目标表面积， m^2 ； E_{sun} 为太阳常数， $E_{\text{sun}}=1\ 353\text{ W}/\text{m}^2$ ； E_2 为地球对太阳的反照常数， $E_2=0.3 E_{\text{sun}}=406\text{ W}/\text{m}^2$ ； E_3 为地球的热发射常数， $E_3=237\text{ W}/\text{m}^2$ ； α_1 为目标表面对太阳辐射的吸收率； α_2 为目标表面对地球及大气系统反照辐射的吸收率； ε 为目标表面材料在温度 T 下的发射率； σ 为斯特潘·玻耳兹曼常数， $\sigma=5.67 \times 10^{-8}\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ； R 为地球半径， $R=6\ 371\text{ km}$ ； h 为目标地面高度， km ； T 为目标表面温度， K 。

若目标进入地球阴影区，目标表面的热平衡方程为：

$$T'=\left(\frac{A_{\text{pe}} b_2 E_3}{A \sigma}\right)^{1/4} \quad (12)$$

2.2.3.2 目标自身红外辐射计算

若空间目标表面平衡温度为 T ，表面材料或涂层的红外发射率为 ε ，目标对探测方向的投影面积为 A_d ，则在红外波段 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 区，空间目标自身辐射在红外探测器处产生的辐照度 $E_{\lambda_1 \sim \lambda_2}$ 为：

$$E_{\lambda_1 \sim \lambda_2}=\frac{\varepsilon \cdot A_d}{R^2} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L_{b\lambda}(T) d\lambda \quad (13)$$

式中： R 为目标至红外探测器距离， km ； λ 为波长， μm ； T 为目标表面温度， K ； $L_{b\lambda}(T)$ 为温度为 T 的黑体光谱辐射亮度， $\text{W}/(\text{sr} \cdot \text{m}^2 \cdot \mu\text{m})$ 。

光谱辐射亮度 $L_{b\lambda}(T)$ 的公式为：

$$L_{b\lambda}(T)=1.191\ 0 \times 10^8 \lambda^{-5} \left(e^{\frac{14\ 388}{\lambda T}}-1\right)^{-1} \quad (14)$$

最后计算自身的红外辐射和反射外界辐射源产生的红外辐射可得整个空间目标的红外辐射特性,即:

$$E = E_{\lambda_1 - \lambda_2} + E_{ref} \quad (15)$$

3 空间目标红外特性仿真

3.1 建立坐标系

建立目标本体坐标系 $OXYZ$ 。原点为卫星目标的质心; OZ 通过坐标原点,从卫星目标的质心指向地心; OX 通过坐标原点,位于轨道平面内垂直于 OZ ,在对地定向状态下指向前进方向; OY 垂直于轨道平面,指向轨道角速度的负方向。 $OXYZ$ 坐标系为直角坐标系,与卫星星体固连。如图 5 所示。

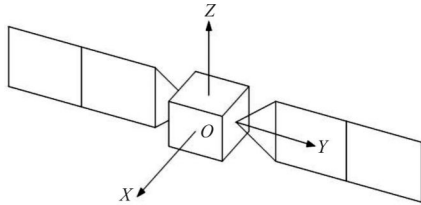


图 5 目标本体坐标系

Fig.5 Body coordinate system of the target

3.2 位置计算

太阳、观测卫星和目标卫星相对于地球的运动遵循开普勒定律,常用椭圆运动方程表示为:

$$M = (t - \tau) \sqrt{1/a^3} \quad (16)$$

$$v = M + e(2 - e^2/4 + 5e^4/96) \sin M + e^2(5/4 - 11e^2/24) \sin 2M + e^3 \cdot (13/12 - 43e^2/64) \sin 3M + 103e^4 \cdot \sin 4M/96 + 1097e^5 \sin 5M/960 \quad (17)$$

$$r = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos v} \quad (18)$$

式中: a 为轨道半长轴; e 为轨道偏心率; t 为观测时刻; τ 为过近地点时刻,均采用 J2000.0 标准历元起算的儒略日计时。

若知道太阳、观测卫星和目标卫星的轨道根数,由开普勒定律可得太阳、观测卫星和目标卫星在 J2000.0 惯性坐标系中的矢量坐标:

$$p = R_z(-\Omega) R_x(-i) R_z(-\omega) p_0 \quad (19)$$

式中: i 为轨道倾角; Ω 为升交点赤经; ω 为近地点幅角; $p_0 = (r \cos v, r \sin v, 0)$;

$$R_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}; R_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 & -\sin \theta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \theta & 0 & \cos \theta \end{bmatrix}; R_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

$$R_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

为了便于目标特性分析,将各量在 J2000.0 惯性坐标系中的矢量坐标转换到卫星本体坐标系,则为:

$$q = L_{001} R_z(\omega) R_x(i) R_z(\Omega) p \quad (20)$$

式中: q 为各量在卫星本体坐标系中的矢量坐标; L_{001} 为坐标轴的反向变换矩阵。

$$L_{001} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

因此,求出太阳、地球、观测卫星在卫星本体坐标系下的矢量坐标,结合前面建立的数学模型,即可求得目标在探测器入瞳处的辐照度。

3.3 特性仿真

3.3.1 仿真参数选择

(1) 目标参数

a. 几何参数

- ① 目标本体尺寸:2000mm×2000mm×2500mm;
- ② 太阳帆板尺寸:2200mm×2700mm。

b. 物性参数

目标主体材料为铝,表面均方根粗糙度 $\sigma = 0.2 \mu\text{m}$,表面自相关长度 $a = 5 \mu\text{m}$,反射率 $\rho = 0.81$,太阳帆板材料为电池片,表面均方根粗糙度 $\sigma = 0.05 \mu\text{m}$,表面自相关长度 $a = 2.0 \mu\text{m}$,反射率 $\rho = 3$ 。

(2) 轨道参数

a. 太阳轨道参数

- ① 轨道半长轴: $a_s = 1.000\ 001\ 024 a_u$ ($1A_u = 1.495\ 978\ 92 \times 10 \text{ km}$);
- ② 轨道偏心率: $e_s = 0.016\ 708\ 62 - 0.000\ 042\ 04T - 0.000\ 001\ 24T^2$;
- ③ 轨道倾角: $i_s = 23.439\ 291^\circ - 0.013\ 004\ 17^\circ T - 0.000\ 000\ 16^\circ T^2$;
- ④ 升交点赤经: $\Omega_s = 0.0^\circ$;
- ⑤ 近地点幅角: $\omega_s = 282.937\ 347^\circ + 0.322\ 562\ 06^\circ T - 0.000\ 157\ 57^\circ T^2$;
- ⑥ 过近地点时刻:1950-1-3.02。

其中, $T = (\text{某时的儒略日数} - \text{J2000.0 的儒略日数}) / 365.25 = (t - 2\ 451\ 545.0) / 36\ 525$ 。

b. 观测卫星轨道参数

- ① 轨道半长轴: $a_d=6\ 863.102\ 48\ \text{km}$;
- ② 轨道偏心率: $e_d=0.001$;
- ③ 轨道倾角: $i_d=97.39^\circ$;
- ④ 近地点幅角: $\omega_d=157.930^\circ$;
- ⑤ 升交点赤经: $\Omega_d=330^\circ$;
- ⑥ 过近地点时刻: 2000-01-12 03:23:12。

c. 目标卫星轨道参数

- ① 轨道半长轴: $a_o=7028\text{km}$;
- ② 轨道偏心率: $e_o=0.05$;
- ③ 轨道倾角: $i_o=98.5^\circ$;
- ④ 近地点幅角: $\omega_o=30^\circ$;
- ⑤ 升交点赤经: $\Omega_o=60^\circ$;
- ⑥ 过近地点时刻: 2003-02-05 10:12:00。

3.3.2 仿真流程

空间目标特性仿真计算流程如图 6 所示。

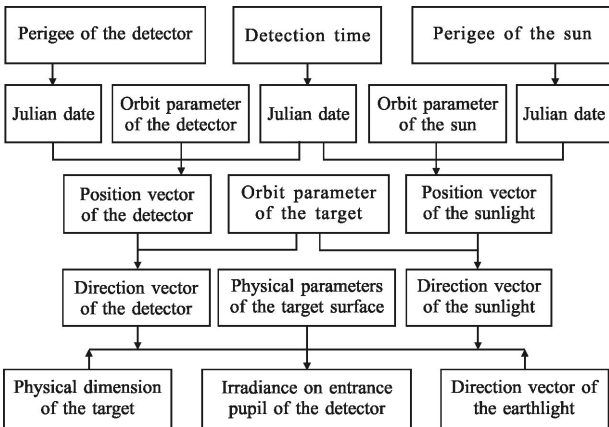


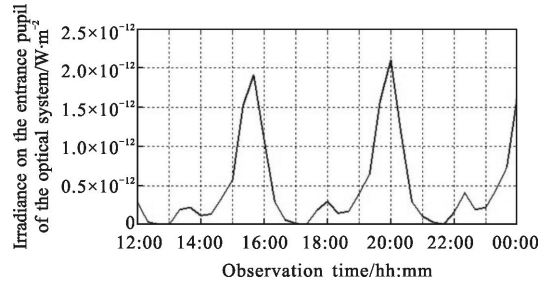
图 6 空间目标特性仿真计算流程

Fig.6 Simulation flow for the characteristics of space targets

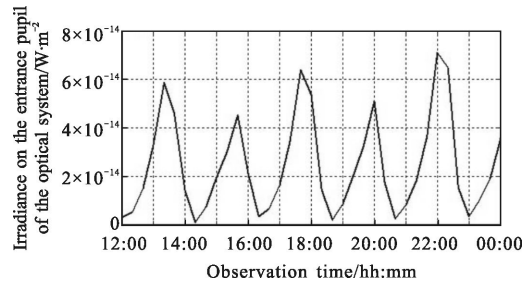
3.3.3 仿真结果

根据卫星目标的几何结构参数与材质物性参数以及太阳、目标星与观测星轨道参数,仿真时间设定为 2014 年 10 月 30 日 12 时~14 时,仿真计算获得的卫星目标在光学系统入瞳处产生的辐照度随观测时间的变化如图 7 所示,探测距离随观测时间的变化如图 8 所示。

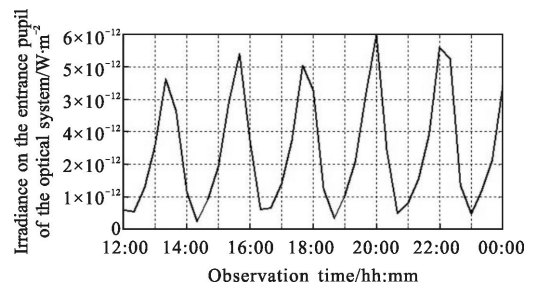
从仿真结果可以看到,对于探测光学系统入瞳处接收的辐照度,来自卫星本体的贡献比来自卫星帆板的贡献约大于一个量级,表明卫星工作过程中,卫星本体的辐射更强。另外,光学系统入瞳处产生的辐照度随观测时间的周期变化以及探测距离随观测时间的周期变化可以为红外空间目标探测系统的信



(a) 卫星本体
(a) Satellite body



(b) 太阳帆板
(b) Solar sail



(c) 整星
(c) Whole satellite

图 7 卫星目标在探测光学系统入瞳处产生的辐照度随观测时间的变化

Fig.7 Relationship of the irradiance on entrance pupil of the optical detection system from the targets and observation time

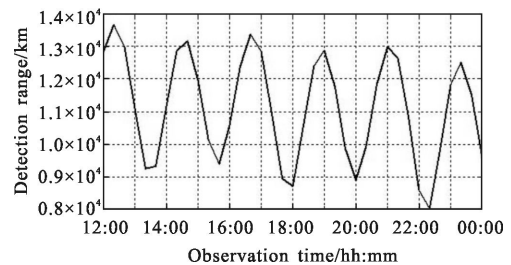


图 8 探测距离随观测时间的变化

Fig.8 Relationship of detection range of the targets and observation time

噪比分析以及作用距离估算提供数据支持。

4 结论

对天基空间目标红外动态辐射特性进行了理论建模与仿真研究,仿真获得了卫星本体、太阳帆板以及整星在探测光学系统入瞳处产生的辐照度随观测时间的动态变化,从仿真结果可以看出,来自卫星本体的辐射能量更强,约比来自太阳帆板的辐射能量大一个量级。计算结果合理可靠,充分验证了建模方法的有效性。需要指出的是,空间目标红外辐射特性的空间分布不仅与目标的外形结构、飞行姿态和表面材料有关,而且还与太阳、地球和目标三者之间的相对位置有关,辐射特性表现出明显的方向性和时间性。总之,空间目标红外特性建模方法与仿真结果为天基红外探测与识别系统方案设计、指标论证以及系统性能评估提供了理论方法与技术手段。

参考文献:

- [1] Union of Concerned Scientists. UCS Satellite Database [EB/OL]. (2015-12-31) [2016-01-20] http://www.ucsusa.org/nuclear_weapons_and_global_security/solutions/space-weapons/ucs-satellite-database.html.
- [2] Wu Xiaodi, Huang Chaochao, Wang Yicheng, et al. Influence of physical parameters of solar panels on infrared feature of a satellite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(8): 1962-1966. (in Chinese)
吴晓迪, 黄超超, 王一程, 等. 太阳翼物性参数对卫星红外特性的影响[J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(8): 1962-1966.
- [3] Wu Xiaodi, Huang Chaochao, Wang Yicheng, et al. Influence of satellite surface scattering on its temperature and infrared feature[J]. *Laser & Infrared*, 2013, 43(7): 753-756. (in Chinese)
吴晓迪, 黄超超, 王一程, 等. 卫星表面散射对其温度及红外特征的影响[J]. *激光与红外*, 2013, 43(7): 753-756.
- [4] Wu Xiaodi, Huang Chaochao, Ling Yongshun, et al. Surface temperature and infrared feature of a satellite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(5): 805-810.
- [5] Li Yang, Zhao Fei, Zhang Zhiyong, et al. Infrared imaging simulation of taper target in the space [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(2): 309-314. (in Chinese)
李阳, 赵菲, 张志勇, 等. 空间锥形目标的红外成像仿真[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(2): 309-314.
- [6] Wang Ying, Lai Xiaoyi, Huang Jianming, et al. Infrared radiation analysis of space target based on Sinda/G and Matlab [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(5): 1113-1118. (in Chinese)
王盈, 来霄毅, 黄建明, 等. 基于 Sinda/G 和 Matlab 的空间目标红外辐射特性分析[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(5): 1113-1118.
- [7] Han Yuge, Xuan Yimin. Infrared feature of the satellite [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(1): 34-37. (in Chinese)
韩玉阁, 宣益民. 卫星的红外辐射特征研究 [J]. *红外与激光工程*, 2005, 34(1): 34-37.
- [8] Kong Xiangcheng, Liao Shouyi, Su Delun, et al. Numerical simulation of the space target surface temperature field based on Sinda/Fluint [J]. *Infrared Technology*, 2012, 34(10): 1113-1118. (in Chinese)
孔祥成, 廖守亿, 苏德伦, 等. 基于 Sinda/Fluint 的空间目标温度场数值仿真[J]. *红外技术*, 2012, 34(10): 1113-1118.
- [9] Li Yingjie, Lv Xiangyin, Yang Hua. Theoretical calculation of infrared radiation of space target [J]. *Infrared*, 2010, 31(2): 39-43. (in Chinese)
李颖杰, 吕相银, 杨华. 空间目标的红外辐射理论计算[J]. *红外*, 2010, 31(2): 39-43.
- [10] Nicodemus F E. Reflectance, nomenclature and directional reflectance and emissivity [J]. *Applied Optics*, 1970, 9(6): 1474-1475.