

空间目标在轨红外成像仿真

王 盈, 黄建明, 魏祥泉

(上海宇航系统工程研究所, 上海 201109)

摘 要: 为了使空间目标红外成像仿真尽量反应实际在轨工作状态, 文中综合考虑目标自发辐射、太阳光辐射、地球辐射和地球反照的影响, 结合空间目标在轨单点经纬度姿态数据、材料数据、探测器数据等先验信息, 提出了一种空间目标在轨红外成像仿真技术。首先, 阐述了空间目标红外成像仿真的理论模型。然后, 以某简单立方体卫星为例, 进行了在轨红外成像建模与仿真。所提出的空间目标红外成像仿真方法对空间目标探测、识别与跟踪算法的研究具有重要意义。

关键词: 红外成像仿真; 空间目标; 在轨

中图分类号: O434.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)09-2593-05

Infrared imaging simulation of space target in orbit

Wang Ying, Huang Jianming, Wei Xiangquan

(Aerospace System Engineering Shanghai, Shanghai 201109, China)

Abstract: In order to make the infrared images of space target indicating its active state in orbit as real as possible, the contribution of the target spontaneous emission, the solar radiation, the earth radiation and the earth albedo radiation were considered. Combined with the information of the space target attitude and the detector parameters in orbit, a kind of infrared imaging simulation method was proposed in this article. Firstly, the method which is used to simulate the infrared imaging was explained in detail. Then, the method was used to simulate the infrared imaging of a simple cube satellite. The emulation results show that the method is feasible to simulate the infrared imaging of the space target, which has significant sense for the researches of target detection, recognition and tracking techniques.

Key words: infrared imaging simulation; space target; in-orbit

收稿日期: 2015-01-09; 修订日期: 2015-02-07

基金项目: 国家自然科学基金(61573247)

作者简介: 王盈(1986-), 女, 工程师, 主要从事空间目标光学特性方面的研究。Email: a805ases@163.com

0 引言

在空间目标探测手段中, 红外探测具有探测手段隐蔽性好, 对目标背景温差的高敏感性, 能昼夜工作的特点, 成为理想的空目标探测手段, 得到了广泛的应用与发展^[1]。对于空目标红外辐射特性的研究, 国内外已经开展了大量研究^[1], 构建了空目标与深空环境红外特性物理模型, 并将结果量化, 利用计算机图形学的方法进行了红外成像仿真。

空目标红外成像仿真一般仅针对目标自身红外辐射特性进行成像, 很少考虑目标对背景反射特性的影响, 在成像仿真中大都忽略环境背景, 导致成像仿真结果逼真度较差, 不能真实反映空目标的实际在轨工作特性, 难以用于准确检测和评估探测器的性能。

文中结合空目标在轨情况, 根据目标在轨单点经纬度姿态数据、温度分布数据、材料数据、探测器数据等可以对不同观测角度下的目标红外成像进行了仿真。建模与仿真结果为实现空目标红外目标探测、识别与跟踪提供仿真数据。

1 空目标红外成像建模

1.1 红外辐射特性计算模型

空目标红外辐射特性主要受目标自发辐射、太阳光辐射、地球辐射和地球反照的影响^[2-8]。图 1 为目标表面与地球、太阳之间的空几何关系示意图, 其中, L 为目标距离地面微元的距离, dA 为地面微元面积, S 为目标单元面积, R 为地球半径, h 为轨

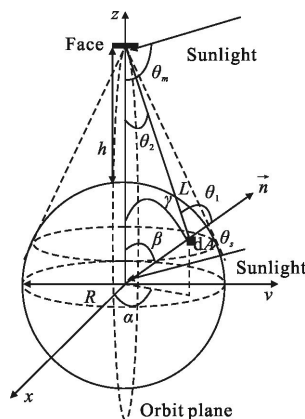


图 1 三轴稳定的目标表面与地球、太阳之间空几何关系图

Fig.1 Space relation among target, earth and sun

道高度, 微元 dA 到面元连线与微元 dA 法向所成的夹角记为 θ_1 , 太阳光与 z 轴的夹角为 γ , θ_1 为太阳光与地面微元法向的夹角, θ_m 为太阳光与目标面元法向的夹角。令面元的半球光谱反射率为 $\rho(\lambda)$, r_{sun} 为太阳半径, L_{sun} 为太阳到空目标的距离。

(1) 目标自发辐射影响

空目标的红外辐射遵循普朗克辐射定律, 即在波段 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 范围的红外辐射功率为^[4-5]:

$$P_{\text{自发}} = S \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \frac{\epsilon_\lambda c_1}{\lambda^5 (e^x - 1)} d\lambda \quad (1)$$

$$x = \frac{c_2}{\lambda T} \quad (2)$$

式中: 第一辐射系数 $c_1 = 2\pi^5 h^6 c^2 / 15 = 3.741844 \times 10^8 \text{ W} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \mu\text{m}^4$; 第二辐射系数 $c_2 = hc/k = 1.438769 \text{ cm} \cdot \text{K}$, k 为波尔兹曼常数; ϵ_λ 为目标表面的光谱发射率; λ 为波长; T 为绝对温度。

(2) 太阳辐射影响

一般认为太阳是绝对温度为 5900 K 的绝对黑体, 则光谱辐射通量密度为:

$$W_s(\lambda) = \frac{2\pi h_{\text{普}} c^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{c/\lambda T} - 1} \quad (3)$$

式中: $h_{\text{普}}$ 为普朗克常数; c 为真空中的光速; T 为太阳黑体温度。

则在波段 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 范围内, 目标面元反射的太阳光辐射功率为:

$$P_s = \frac{\cos \theta_m S r_{\text{sun}}^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho(\lambda) W_s(\lambda) d\lambda}{L_{\text{sun}}^2} \quad (4)$$

(3) 地球辐射影响

令地球光谱辐射通量密度为 $W_e(\lambda)$, 在波段 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 范围内, 目标表面单元接受到的辐射功率为 P_e , 参照图 1 所示, 面元反射的地面微元辐射可以表示为:

$$P_e = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho(\lambda) W_e(\lambda) d\lambda \cdot dA \cdot \cos \theta_1 \cdot \frac{S}{\pi L^2} \cdot \cos \theta_2 \quad (5)$$

(4) 地球反照影响

地球对太阳辐射的反射可认为是地表均匀的漫反射, 由此在计算地球反射的太阳辐射时可将地球当作二次光源来处理, 则在波段 $\lambda_1 \sim \lambda_2$ 范围内, 目标单元表面所反射的地球微元反照为:

$$P_{\text{earthref}} = \frac{a \cdot r_{\text{sun}}^2 \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho(\lambda) W_s(\lambda) d\lambda \cdot \cos \theta_s}{\pi L_{\text{sun}}^2} dA \cos \theta_1 \frac{S}{\pi L^2} \cos \theta_2 \quad (6)$$

式中: a 为地面对太阳的漫反射系数,取0.35。

(5) 红外辐射特性求解

通过上述分析,空间目标面元红外辐射功率可表示为:

$$P = P_{\text{自发}} + P_e + P_{\text{earthref}} + P_s \quad (7)$$

令面元至测量传感器的距离为 L_{ce} ,其与面元法线方向的夹角为 Θ ,则探测器接收的空间目标面元红外辐射通量密度为:

$$W_{ce} = \frac{\cos \Theta P}{\pi L_{ce}^2} \quad (8)$$

1.2 相机成像模型

1.2.1 成像几何模型

成像过程指三维空间到二维平面上的投影,三维空间中的物体到象平面的投影关系即为成像模型。探测器镜头为一个成像系统,光线经其聚焦到像面上。空间目标红外成像特性建模就是根据几何模型研究目标在探测器像面上的能量分布情况。

相机成像建模是一个复杂的过程,涉及到相机内部信噪比、相机灵敏度、相机镜头、增益、噪声电流等一系列参数,文中进行了一定的简化:相机模型中,只考虑相机的焦距,像素尺寸以及靶面大小等相关因素的影响。

结合目标反射、自发辐射辐射亮度分析结果,获得探测器像面单元的辐射通量为:

$$P_{\text{像面}} = \tau S_{\text{目标投影}} \Omega N \quad (9)$$

式中: τ 为光学系统的光谱透过率; $S_{\text{目标投影}}$ 为探测器像面单元对应的目标投影面积; Ω 为探测口径相对目标所张的立体角; N 为目标反射、自发辐射亮度。

根据物像位置关系及几何成像原理,在探测器像面单元上得到的辐射照度为:

$$H_{\text{像面}} = \frac{P_{\text{像面}} L_{ce}^2}{S_{\text{目标投影}} f^2} \quad (10)$$

式中: f 为有效焦距^[2]。

1.2.2 图像灰度计算

将像面单元的辐射照度值数据进行灰度等级转换,绘制目标图像。一幅图像中像面单元对应的最高和最低辐射照度分别为 H_{max} 和 H_{min} ,设图像灰度等级为0~255级,则对应于辐射照度为 $H(j)$ 的像面单元,其灰度值为:

$$G(j) = \frac{H(j) - H_{\text{min}}}{H_{\text{max}} - H_{\text{min}}} \times 255 \quad (11)$$

综上所述,根据太阳、地球、目标和探测器之间

的相对位置关系,基于目标和探测器的轨道参数,给定目标的结构特性参数、材料特性参数以及探测器的技术参数,便可以计算空间目标在探测器像面上的能量分布情况,获得目标的红外特征。

2 空间目标在轨红外成像仿真

立方体是比较简单的目标,也是大多数空间卫星的基本结构之一。对其进行仿真有助于进一步解决复杂目标的仿真分析。因此,文中以立方体卫星模型为例,针对在轨情况进行了空间目标红外成像特性仿真。

2.1 输入条件

对空间目标进行红外成像仿真需要的输入条件包括几何参数与表面材料参数、目标轨道与姿态参数、探测器参数等。

2.1.1 目标几何参数与表面材料参数

表1给出了立方体卫星几何尺寸与表面热控材料参数。

表1 立方体卫星几何尺寸与表面热控材料参数
Tab.1 Geometry and surface thermal material parameters of the cube satellite

Type	Size/m	Material of surface	Reflectivity	Absorptivity	Emissivity
Body	1.42×1.42×1.65	F46	0.02	0.35	0.68
Solar board	6×1.5	Battery piece	0.3	0.82	0.81
		Blackboard	0.07	0.88	0.86

2.1.2 目标轨道姿态参数

立方体卫星所在的轨道是圆轨道,对应的轨道姿态参数如表2所示。

表2 立方体卫星轨道姿态参数
Tab.2 Attitude and orbit parameters of the cube satellite

Orbital altitude	Eccentricity	Inclination	Time past perigee	Attitude
568 km	0	98.07°	6:30 AM	+X is the flight direction +Z is the direction to the earth

表3给出了仿真所用探测器主要参数。

表 3 探测器参数

Tab.3 Detector parameters

Resolving power	Focus/mm	Angle of view	Response curve
1 024×768	200	Level angle : 2.67° Vertical angle : 1.98°	

2.2 空间目标在轨红外成像仿真结果

根据输入条件,结合热平衡方程,计算得到不同时刻目标在轨温度分布情况。在此基础上计算获得不同时刻,不同探测方向探测器接收到的目标自发辐射强度值。

当卫星处于地球阴影中时,卫星外部的红外辐射源主要为地球红外辐射,此时红外探测器接收到的目标红外辐射能量最小。

为了便于计算,将地球等效为 250 K 的绝对黑体,则在 7.5~9.5 μm 波段内,结合公式(1)、(5)、(8),表 4 给出了 2013 年 3 月 22 日、6 月 22 日、9 月 22 日

表 4 不同时间、不同观测方位探测器接收到的卫星红外辐射强度

Tab.4 Infrared radiant intensity of the satellite at different time and different observational angles

Time	Angle	Azimuth angle: -30	Azimuth angle: -30	Azimuth angle: 0	Azimuth angle: 0
		Elevation angle: 0 /W·Sr ⁻¹	Elevation angle: 10 /W·Sr ⁻¹	Elevation angle: 0 /W·Sr ⁻¹	Elevation angle: 10 /W·Sr ⁻¹
03-22	Spontaneous radiation	112.4	111.4	15.5	16.6
	Reflect earth radiation	8.1	8.0	0.3	0.4
	Total radiation	120.5	119.4	15.8	17.0
06-22	Spontaneous radiation	79.1	70.5	15.1	16.0
	Reflect earth radiation	8.1	8.0	0.3	0.4
	Total radiation	80.2	78.5	15.4	16.4
09-22	Spontaneous radiation	115.8	114.3	15.5	16.7
	Reflect earth radiation	8.1	8.0	0.3	0.4
	Total radiation	123.9	122.3	15.8	17.1
12-22	Spontaneous radiation	118.9	117.6	15.7	16.9
	Reflect earth radiation	8.1	8.0	0.3	0.4
	Total radiation	126.0	125.6	16.0	17.5

以及 12 月 22 日的地影区时段,探测器接收到的立方体卫星在不同观测角度下的红外辐射强度值。

结合目标红外辐射强度信息,可计算获得像面单元的照度信息,结合公式(11)生成目标灰度图像。图 2 为分别在 2013 年 3 月 22 日、6 月 22 日、9 月 22 日及 12 月 22 日地影区时段,观测方位角 -30°,俯仰角 0°,距立方体卫星 200m 处的红外成像伪彩色仿真结果。

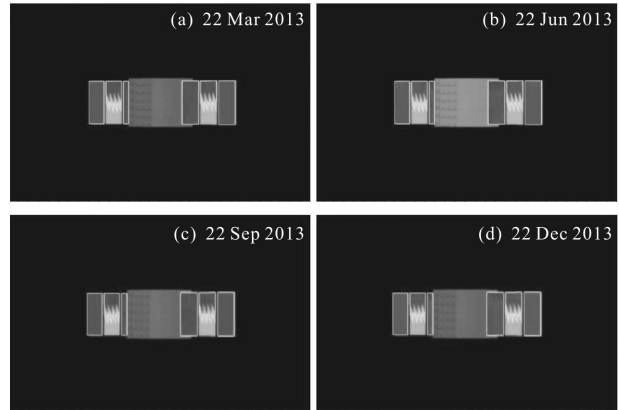


图 2 在轨不同时间立方体卫星红外成像仿真结果

Fig.2 Infrared imaging simulation results of the cube satellite in orbit at different time

图 3 为在 2013 年 6 月 22 日地影区,距离观测立方体卫星 200m 处不同观测角度下的红外成像伪彩色仿真结果。

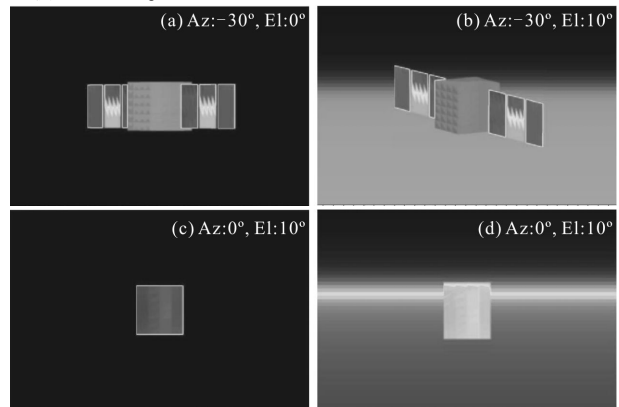


图 3 立方体卫星在不同观测角度下红外成像仿真结果

Fig.3 Infrared imaging simulation results of the cube satellite at different observational angles

由图 2 可知,一年内夏至时刻探测器接收到的目标辐射亮度较低,不利于探测。由图 3 可知,目标的红外特性具有一定的方向性,这与目标的外形结构以及目标、太阳、地球、探测器之间的相对位置关系有关。在方位角为 0°,俯仰角 0°时,目标成像面积

最小,由于目标本体温度低,探测器接收到的目标辐射亮度低;当俯仰角为 10° 时,目标本体基本淹没在地球背景中,不利于探测,因此只有当俯仰角度满足地球背景成像与目标成像无交叠,方位角趋近于 90° 或 -90° 时,目标成像比较清晰。

3 结 论

文中建立了空间目标红外成像仿真物理模型,在此基础上探索了空间目标红外成像物理方法,并进行了具体空间目标的红外成像仿真,仿真结果为空间红外目标探测、识别与跟踪的研究提供了仿真数据。

参考文献:

- [1] Yang Zheng, Zhou Wei, Xu Huizhong. Forecast of IR imaging system applied in military field [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37: 291-294. (in Chinese)
杨争, 周伟, 徐惠忠. 红外成像系统在军事领域的应用前景[J]. 红外与激光工程, 2008, 37: 291-294.
- [2] Sun Chengming, Yuan Yan, Huang Fengzhen, et al. Modeling and simulation on infrared imaging characteristics of space target [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(3): 563-568. (in Chinese)
孙成明, 袁艳, 黄锋振, 等. 空间目标红外成像特性建模与仿真[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(3): 563-568.
- [3] 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.
- [4] Fan Jianying, Wang Yang, Guo Guanglei. Research on simulation of space target's IR image[J]. *Journal of Harbin University of Science and Technology*, 2009, 14(6): 1-4. (in Chinese)
范剑英, 王洋, 郭光磊. 空间目标红外辐射图像仿真研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2009, 14(6): 1-4.
- [5] Du Shenghua, Gong Jiaming, Xia Xinlin. Infrared characteristics of a spacecraft [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37: 432-436. (in Chinese)
杜胜华, 龚加明, 夏新林. 某飞行器红外辐射特性研究[J]. 红外与激光工程, 2008, 37: 432-436.
- [6] Zhou Xiaodong, Guo Ming. Generation of space target's dynamic IR images [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(1): 5-8. (in Chinese)
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.
- [7] Mao Hongxia, Li Xia, Wang Zhangye, et al. Simulation of infrared radiation from outer space targets and environment and its generation technique of scene[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2007, 36(5): 607-610. (in Chinese)
毛宏霞, 李霞, 王章野, 等. 空间目标与环境红外特性理论建模及其场景生成 [J]. 红外与激光工程, 2007, 36(5): 607-610.
- [8] Han Yuge, Xuan Yimin. The study and application of the IR feature of target and background [J]. *Infrared Technology*, 2002, 24(4): 16-19. (in Chinese)
韩玉阁, 宣益民. 目标与背景的红外辐射特性研究及应用[J]. 红外技术, 2002, 24(4): 16-19.