

运动状态对卫星多谱段光学特性的影响分析

王付刚 张 伟 汪洪源 侯晴宇

(哈尔滨工业大学空间光学工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要 综合考虑卫星的背景特性、材料特性、结构特性和轨道特性,研究了在轨运行卫星存在的自旋稳定、三轴稳定和“翻滚”三种运动状态对卫星光学特性的影响。基于光辐射理论,结合探测器的性能参数,建立了自旋稳定、三轴稳定和“翻滚”三种运动类型卫星的多谱段光学特性计算的数学模型,并进行了实验验证。以海洋一号卫星和实践二号卫星为例,进行了运动状态对卫星多谱段光学特性影响的仿真分析。仿真结果表明,不同运动状态的卫星多谱段辐射特性存在较大的差异。分析结果可为卫星的探测和辨识提供一定的参考价值。

关键词 空间光学;卫星;光学特性;多谱段;运动状态

中图分类号 O433.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201232.1004002

Influence of Motion Status on Multispectral Optical Characteristics of Satellites

Wang Fugang Zhang Wei Wang Hongyuan Hou Qingyu

(Research Center for Space Optical Engineering, Harbin Institute of Technology,
Harbin, Heilongjiang 150001, China)

Abstract The background characteristics, materials characteristics, structure characteristics and orbit characteristics of the satellite are comprehensively considered to study the influence of motion status of satellite on its multispectral optical characteristics. The motion status of the satellite can be classified into spin-stabilized, three-axis stabilized and “tumbling” status. Based on optical radiation theory, the calculation model of multispectral characteristics of satellites is built for three kinds of motion status combined with the performance parameters of the detector. Taking HY-1 satellite and SJ-2 satellite as examples, the simulation on influence of motion status on multispectral optical characteristics of satellites is made. The results show that satellites with different motion status exhibit remarkable different multispectral characteristics, which provides a certain reference for detection and identification of satellites.

Key words space optics; satellite; optical characteristics; multispectral; motion status

OCIS codes 000.4430; 240.6490; 290.1483; 310.6188; 350.6090

1 引 言

随着航天技术的迅速发展,进入太空中的目标日益增多,其中一类重要的空间目标就是卫星。从国家太空安全角度出发,对太空中的卫星尤其是其他国家卫星的探测与辨识成为当前的一个研究热点^[1~5]。作为光学探测系统的信息源,卫星的光学

特性在其探测辨识中起着基础性、关键性的作用。由于距离遥远,探测器观测到的卫星大多为点目标,因此本文针对点状卫星目标进行光学特性研究。当前,已经初步建立了静态卫星的光学特性计算模型^[6~9],随着研究的深入,开始考虑把卫星的姿态特性引入到光学特性计算中,研究了小姿态变化对卫

收稿日期: 2012-04-06; **收到修改稿日期**: 2012-05-22

基金项目: 国家 863 计划(2006AA704215)和国家自然科学基金(61007008)资助课题。

作者简介: 王付刚(1980—),男,博士研究生,主要从事空间目标探测与辨识等方面的研究。

E-mail: wfgwfg521@163.com

导师简介: 张 伟(1962—),男,教授,博士生导师,主要从事空间光电信息获取技术、空间目标探测等方面的研究。

E-mail: wzhang@hit.edu.cn

星光度信号的影响^[10,11]。在轨运行卫星存在三轴稳定、自旋稳定和“翻滚”等三种运动状态,不同运动状态会导致卫星反射光谱发生明显的变化,为卫星识别提供了一种新的研究思路。

引入双向反射分布函数(BRDF)描述卫星表面材料的真实光谱反射特性,建立了运动状态相关的卫星多谱段光学特性计算的数学模型,并仿真分析了运动状态变化对卫星多谱段光学特性的影响。

2 卫星光学特性理论建模

在轨卫星光学特性建模主要考虑四个方面:背景光源特性,主要指太阳在卫星表面的直接照射,太阳可等效为色温为 5770 K 的黑体,其在大气层外的光谱分布可根据普朗克黑体辐射定律及太阳半径、日地间平均距离进行计算;材料光谱反射特性,主要用光谱 BRDF 描述;卫星几何结构,采用区域分解与网格划分的方法,具体实现方法见文献[9];照明与观测矢量,结合太阳、卫星和探测器的轨道根数及卫星本体运动特性进行计算。

2.1 照明-观测矢量计算

在轨卫星的运动状态分为自旋稳定、三轴稳定和“翻滚”三种。自旋稳定卫星绕长轴旋转,探测器保持对地指向;三轴稳定卫星本体在轨道坐标系中保持恒定,帆板保持对日指向;“翻滚”卫星主要指失效卫星,在摄动力作用下绕其短轴旋转。

为确定卫星表面光线入射方向及观测方向,建立 J2000.0 惯性坐标系、轨道坐标系与卫星本体坐标系,如图 1 所示。基于太阳、卫星及探测器的轨道参数进行坐标变换,确定它们之间的相对位置关系。

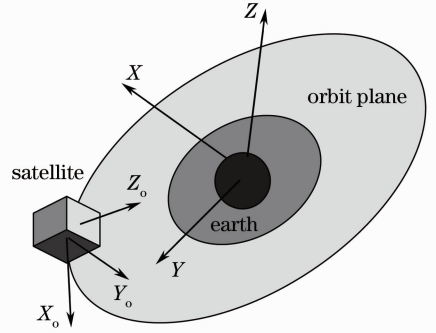


图 1 坐标系

Fig. 1 Coordinate systems

J2000.0 惯性坐标系 $F_1, O-XYZ$ 。原点 O 位于地球的质心, OX 轴和 OZ 轴分别指向春分点和北极,并与 OY 轴构成右手直角坐标系。

轨道坐标系 $F_0, O_0-X_0Y_0Z_0$ 。原点 O_0 位于卫星的质心, O_0X_0 轴与轨道速度方向一致, O_0Z_0 轴指向地心, O_0Y_0 轴垂直于轨道平面并构成右手直角坐标系。

卫星本体坐标系 $F_B, O_b-X_bY_bZ_b$ 。原点 O_b 位于卫星的质心,三轴为卫星的三个惯性主轴。其中 O_bX_b 为滚动轴, O_bY_b 为俯仰轴, O_bZ_b 为偏航轴。

太阳、卫星和探测器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

$$M = (t - \tau) \sqrt{\mu/a^3}, \tag{1}$$

$$v = M + e(2 - e^2/4 + 5e^4/96) \sin M + e^2(5/4 - 11e^2/24) \sin 2M + e^3(13/12 - 43e^2/64) \sin 3M + 103e^4 \sin 4M/96 + 1097e^5 \sin 5M/960, \tag{2}$$

$$r = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos v}, \tag{3}$$

式中 $\mu = 3.986032 \times 10^{14} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-2}$ 为开普勒常数, a 为轨道半长轴(km), e 为轨道偏心率, t 为观测时刻, τ 为过近地点时刻。 t 与 τ 均采用 J2000.0 标准历元起算的儒略日计时。

若给定太阳、卫星和探测器的轨道根数,由开普勒定律可得太阳、卫星和探测器在 J2000.0 惯性坐标系中的矢量坐标

$$\mathbf{p} = \mathbf{R}_z(-\Omega) \mathbf{R}_x(-I) \mathbf{R}_z(-\omega) \mathbf{p}_0, \tag{4}$$

式中 I 为轨道倾角, Ω 为升交点赤经, ω 为近地点辐

角; $\mathbf{R}_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & \sin \theta \\ 0 & -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$ 为绕 x 轴旋转矩

阵; $\mathbf{R}_z(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$ 为绕 z 轴旋转矩

阵; $\mathbf{p}_0 = (r \cos v, r \sin v, 0)$ 为近焦坐标系下的矢量坐标。

将各量在 J2000.0 惯性坐标系中的矢量坐标转换到轨道坐标系,为

$$\mathbf{q}_o = \mathbf{L}_{001} \mathbf{R}_z(\omega + \nu) \mathbf{R}_x(I) \mathbf{R}_z(\Omega) \mathbf{p}, \quad (5)$$

式中 \mathbf{q}_o 为各量在轨道坐标系中的矢量坐标； $\mathbf{L}_{001} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}$ 为第一轨道坐标系与第二轨道坐标系之间的转换矩阵。

为了便于光学特性计算，将各量在轨道坐标系中的矢量坐标转换到卫星本体坐标系，为

$$\mathbf{q} = \mathbf{A} \mathbf{q}_o, \quad (6)$$

式中 \mathbf{A} 为卫星姿态矩阵。

姿态矩阵由旋转变换矩阵表示为

$$\mathbf{A}_{zxy} = \mathbf{R}_y(\varphi) \mathbf{R}_x(\theta) \mathbf{R}_z(\Psi), \quad (7)$$

式中 Ψ 为卫星绕偏航轴转动的角度，即偏航角，向右偏转为正，向左偏转为负； θ 为卫星绕俯仰轴转动的角度，即俯仰角，向上为正又称抬头，向下为负又称低头； φ 为卫星绕滚动轴转动的角度，即滚动角，逆时针为正，顺时针为负。 Ψ, θ 与 φ 称为卫星姿态描述的欧拉角。

对自旋稳定卫星和“翻滚”卫星，表面面元都绕某一个确定轴旋转，设旋转角速度为 ω ，则在观测时刻 t ，面元在卫星本体坐标系中的位置矢量为

$$\mathbf{q}_{\text{facet},t} = \mathbf{R}_n[\omega(t - t_0)] \mathbf{q}_{\text{facet},t_0}, \quad (8)$$

式中 \mathbf{R} 为旋转矩阵； n 为旋转轴，为 x, y, z 轴中的某一个； $\mathbf{q}_{\text{facet},t_0}$ 为初始时刻面元在卫星本体坐标系中的位置矢量。

因此，给定太阳、卫星和探测器的轨道参数及描述卫星姿态特性的欧拉角后，便可计算本体坐标系中卫星表面光线入射方向及观测方向，结合自旋稳定卫星和“翻滚”卫星的旋转角速度，便可计算卫星表面面元的入射天顶角和反射天顶角。

2.2 表面材料光谱反射特性

卫星表面材料主要包括电池片、二次表面镜型热控涂层及涂料型热控涂层。其中电池片主要贴在太阳翼正面，二次表面镜型热控涂层主要包覆卫星本体，涂料型热控涂层（白漆或者黑漆）主要涂在太阳翼背面或者卫星小的附件上。电池片与二次表面镜型热控涂层对卫星光学特性起决定性作用，二者均具有较强的镜反射特性，因此传统的将卫星表面看作漫反射面的建模方法已不能满足卫星光学特性建模精度的要求。本文利用可以有效描述卫星表面反射特性的 BRDF 进行卫星光学特性计算。

BRDF 是由美国学者 Nicodemus^[12] 最早提出的，是从辐射度学出发，在几何光学的基础上描述各

种表面反射特性的函数，表示了不同入射方向下物体表面在任意观测方向上的反射特性。

BRDF 是描述表面反射特性的具有唯一确定性的函数，定义为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

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i, \lambda)}, \quad (9)$$

式中 θ_i 为入射天顶角， φ_i 为入射方位角， θ_r 为反射天顶角， φ_r 为反射方位角， L_r 为面元 dA 在 (θ_r, φ_r) 方向上的反射光谱辐亮度 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)， E_i 表示面元 dA 在 (θ_i, φ_i) 方向上的入射光谱辐照度 ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$)，如图 2 所示。

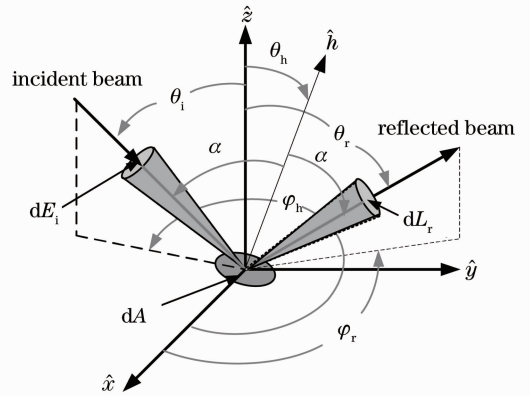


图 2 双向反射分布函数几何图

Fig. 2 Geometry of BRDF

BRDF 是入射角 (θ_i, φ_i) 、反射角 (θ_r, φ_r) 、波长 λ 的函数，由材料自身特性如表面粗糙度、自相关长度、菲涅耳反射率等因素决定。

二次表面镜型热控涂层和电池片具有较强的镜反射特性，可利用 BRDF 进行描述。Sun 模型是一个基于表面微面元高斯分布统计概率建立的 BRDF 模型^[13]，可以很好地匹配光滑表面和粗糙表面。改进的模型表达式为

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{\bar{F}(\alpha, \lambda) V(\theta_i) V(\theta_r)}{16\pi^2 \cos \theta_i \cos \theta_r \cos^4 \theta_h} \exp\left(-\frac{\tan^2 \theta_h}{\sigma^2}\right), \quad (10)$$

式中 \bar{F} 为菲涅耳反射率； $V(\theta)$ 为遮挡因子， $V(\theta) = \exp\{-0.7 \sigma \tan \theta \exp[-1/(4\sigma^2 \tan^2 \theta)]\}$ ； σ 为材料表面均方根 (RMS) 粗糙度； θ_h 为微面元法线与表面平均法线之间的夹角。

由于材料的菲涅耳反射跟波长有关，且系数难以获得，因此采用 Schlick^[14] 的方法进行拟合。对某一确定波长，其菲涅耳反射率表达式为

$$\bar{F}(\lambda) = f_0(\lambda) + [1 - f_0(\lambda)](1 - \cos \alpha)^{n_1}, \quad (11)$$

式中 f_0 为正入射时材料的菲涅耳系数; α 为入射(反射)光线与微面元法线之间的夹角, 又称为半角; n_1 为待定系数。模型中各符号几何位置如图 2 所示。

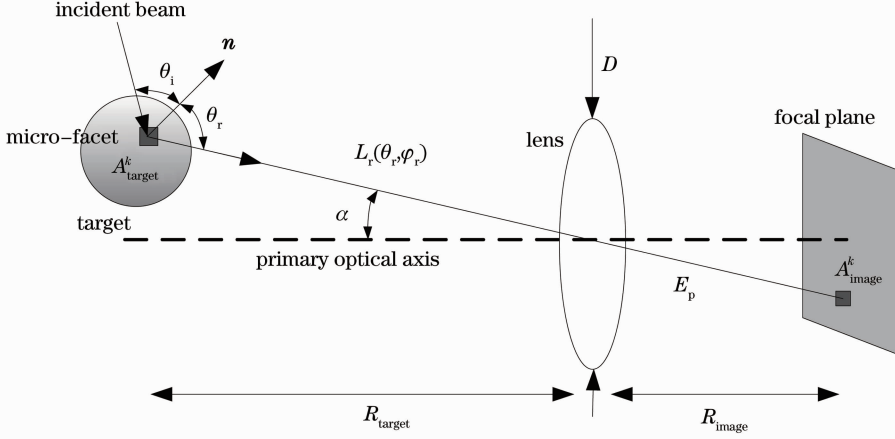


图 3 卫星光学特性分析几何模型

Fig. 3 Geometrical model of optical characteristics of satellites

由基本辐射理论, 网格单元 k 反射背景辐射在探测光学系统入瞳处的光谱辐通量为

$$\Phi_{\text{aperture}}^k(\lambda) = L_r(\theta_r, \varphi_r, \lambda) A_{\text{target}}^k \left(\frac{\pi}{4} \right) \times \left(\frac{D}{R_{\text{target}}} \right)^2 \cos \theta_r \cos^3 \alpha, \quad (12)$$

式中 A_{target}^k 为网格单元 k 表面面积, $L_r(\theta_r, \varphi_r, \lambda)$ 为反射的光谱辐亮度, D 为探测光学系统入瞳直径, R_{target} 为目标在光轴上投影到光学系统入瞳的距离, α 为网格单元 k 与入瞳中心的连线与光轴间的夹角。

根据 BRDF 的定义, 网格单元 k 的反射光谱辐亮度为

$$L_r(\theta_r, \varphi_r, \lambda) = f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) E_{\text{sun}}(\lambda) \cos \theta_i, \quad (13)$$

式中 $E_{\text{sun}}(\lambda)$ 为网格单元 k 处的太阳光谱辐照度, $f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)$ 为网格单元 k 表面材料的光谱 BRDF。

设光学系统的光谱透过率为 $\tau(\lambda)$, 结合(12)式和(13)式可以得到网格单元 k 在探测器像面处产生的光谱辐通量为

$$\Phi_{\text{image}}^k(\lambda) = A_{\text{target}}^k \tau(\lambda) \left(\frac{\pi}{4} \right) \left(\frac{D}{R_{\text{target}}} \right)^2 \times \cos \theta_r \cos \theta_i \cos^3 \alpha f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) E_{\text{sun}}(\lambda). \quad (14)$$

对所有既能被照明又能被探测器观测到的网格单元求和, 便可得到卫星整体在探测器像面处产生的光谱辐通量, 即

2.3 卫星光学特性计算的数学模型

为了准确计算卫星光学特性, 在几何结构特性建模中采用网格划分的方法, 卫星整体光学特性为所有面元网格光学特性的求和。图 3 为网格单元 k 的反射光到达探测器像面的传输过程。

$$\Phi_{\text{image}}(\lambda) = \sum_k A_{\text{target}}^k \tau(\lambda) \frac{\pi}{4} \left(\frac{D}{R_{\text{target}}} \right)^2 \times \cos \theta_r \cos \theta_i \cos^3 \alpha f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) E_{\text{sun}}(\lambda). \quad (15)$$

结合多谱段探测器件的光谱量子响应函数, 可得卫星的多谱段光谱辐通量为

$$\Phi_m(\lambda) = \Phi_{\text{image}}(\lambda) \eta_m(\lambda), \quad (16)$$

式中 $\eta_m(\lambda)$ 为探测器光谱量子响应函数, m 为探测器的光谱通道, Red、Green、Blue 三通道。

2.4 试验验证

为验证光学特性计算模型的准确性, 结合当前仪器水平, 设计并搭建了实验室测量平台, 如图 4 所示。测量平台主要包括照明系统、探测系统、机械转动系统、数据处理系统。照明系统采用美国 Newport 公司的 Solar 3A 级太阳模拟器, 出光口径为 300 mm; 探测器选用荷兰 Avantes 公司生产的 AvaSpec-2048 型光纤光谱仪; 转台为北京光学仪器厂制造的电控旋转台 MRS103。

实验测量了比例为 23:1 的某三轴稳定卫星缩比模型。入射天顶角为 30° , 反射天顶角为 30° , 方位角相差 180° 时, 卫星反射光谱测量数据与理论计算结果如图 5 所示。图中红色点代表理论计算值, 蓝色星号表示缩比模型测量值, 二者相对均方根误差为 11.53%, 测量结果验证了模型的准确性(彩图见网络电子版)。

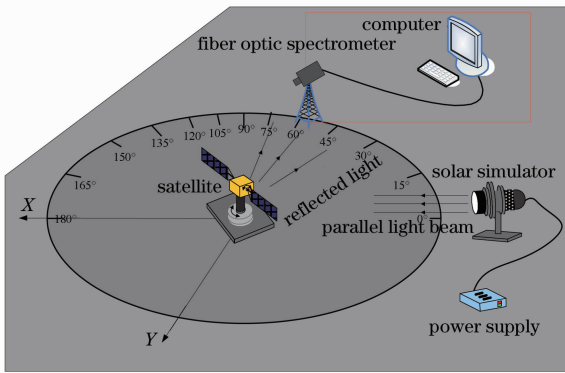


图 4 测量平台示意图

Fig. 4 Schematic of measurement platform

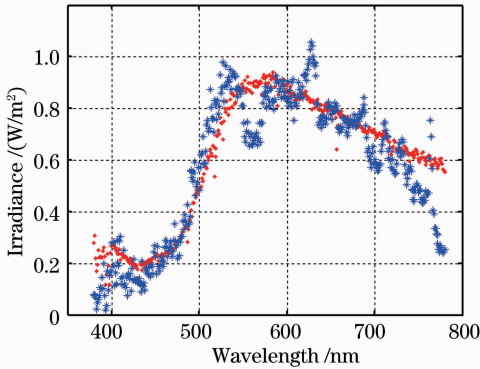


图 5 目标整体反射辐照度测量与计算值

Fig. 5 Measured and calculated data of reflected irradiance of satellite

3 卫星光学特性计算

3.1 计算参数

3.1.1 卫星结构特性参数

海洋一号卫星, 本体尺寸为 1.2 m × 1.1 m × 0.996 m, 太阳翼在轨展开后跨度为 7.529 m。

实践二号卫星, 主体为一外接圆直径为 1.23 m 的八面棱柱体, 高为 1.1 m, 卫星的自旋速率为 15 r/min。两颗卫星的结构如图 6 所示。

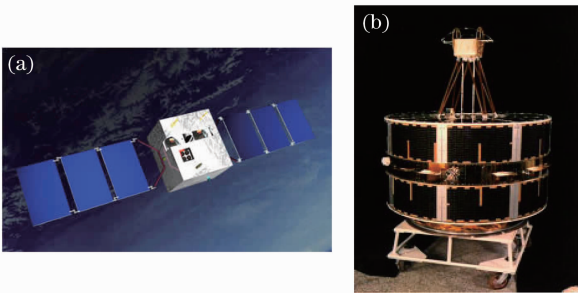


图 6 卫星结构。(a)海洋一号卫星；(b)实践二号卫星

Fig. 6 Structure of satellites. (a) HY-1 satellite;

(b) SJ-2 satellite

3.1.2 卫星材料特性参数

仿真计算过程中, 海洋一号卫星本体表面包覆黄色热控材料, 帆板正面贴满太阳能电池片, 帆板背面涂有机黑漆。实践二号卫星侧面贴满太阳能电池片, 上下两个底面涂有机白漆。

三种材料的表面粗糙度及波长 555 nm 处的菲涅耳反射系数如表 1 所示^[15]。

表 1 模型参数

Talbe 1 Model parameters

Material	RMS (σ)/ μm	Fresnel coefficient (f_0)	Constant (n_1)
Yellow thermal control material	0.014	0.0773	4.11
Solar cell	0.02	0.0156	8.31

3.1.3 卫星轨道特性参数

探测卫星轨道参数: 轨道半长轴 $a_d = 42164.2$ km, 偏心率 $e_d = 0$, 轨道倾角 $i_d = 0^\circ$, 近地点幅角 $\omega_d = 0^\circ$, 升交点赤经 $\Omega_d = 328.984^\circ$, 卫星过近地点时刻 2007-07-01T10:00:00。

目标卫星轨道参数: 轨道半长轴 $a_t = 6778.14$ km, 偏心率 $e_t = 0$, 轨道倾角 $i_t = 97.0346^\circ$, 近地点幅角 $\omega_t = 0^\circ$, 升交点赤经 $\Omega_t = 279.066^\circ$, 卫星过近地点时刻 2007-07-01T12:00:00。

3.2 计算结果

采用美国柯达公司的 KAI-02150 CCD 成像器件作为探测器件, 仿真计算了目标卫星在探测器 Red、Green、Blue 三通道的反射信号。为了显示方便, 下面给出四个时刻目标卫星的多谱段反射信号, 如图 7~10 所示。

1) 图 7 为三轴稳定的海洋一号卫星在观测开始后 1、20、40、60 s 的反射信号。由文献[15]可知, 在此时间段内卫星本体的照明、观测方向矢量保持不变, 图中卫星反射信号的变化主要是由于帆板保持对日指向运动造成的。

2) 由于实践二号卫星的自旋周期为 4 s, 图 8 给出了观测开始后 0.36、0.44、0.52、0.6 s 的反射信号。四个时刻, Red 通道在 620 nm 处的光谱辐通量分别为 3.582×10^{-17} 、 3.582×10^{-17} 、 3.582×10^{-17} 、 3.582×10^{-17} W/nm。由于观测时间较短, 照明观测几何条件在四个时刻不变, 信号幅值发生变化主要是由实践二号的旋转运动造成的。

3) 仿真计算过程中, “翻滚”卫星的旋转周期为 30 s。图 9 和图 10 中的四个观测时刻均为 1、7.5、15、22.5 s。两幅图均呈现出了周期性, 但图 9 中

7.5 s和 22.5 s 两时刻反射信号不相同,这是由于帆板正面和背面材料不同造成的。对比图 9 和图 10,

二者虽然均做“翻滚”运动,但是各谱段辐通量形状相差较大,这是因为二者表面材料不同造成的。

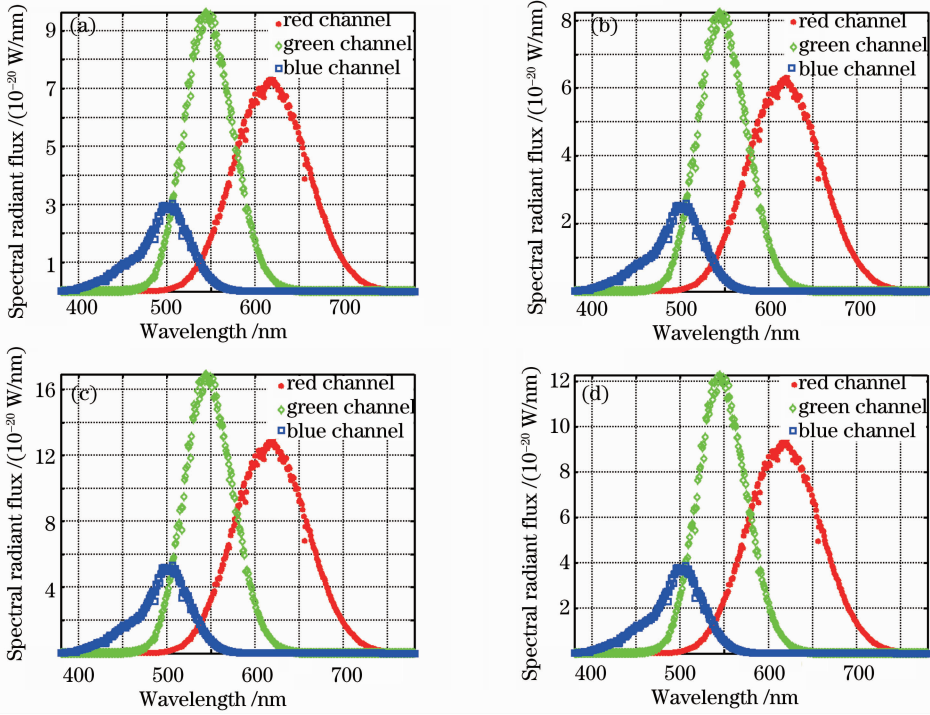


图 7 不同时刻海洋一号反射多谱段辐通量。(a) 1 s; (b) 20 s; (c) 40 s; (d) 60 s

Fig. 7 Multispectral radiant flux of HY-1 at different observation time. (a) 1 s; (b) 20 s; (c) 40 s; (d) 60 s

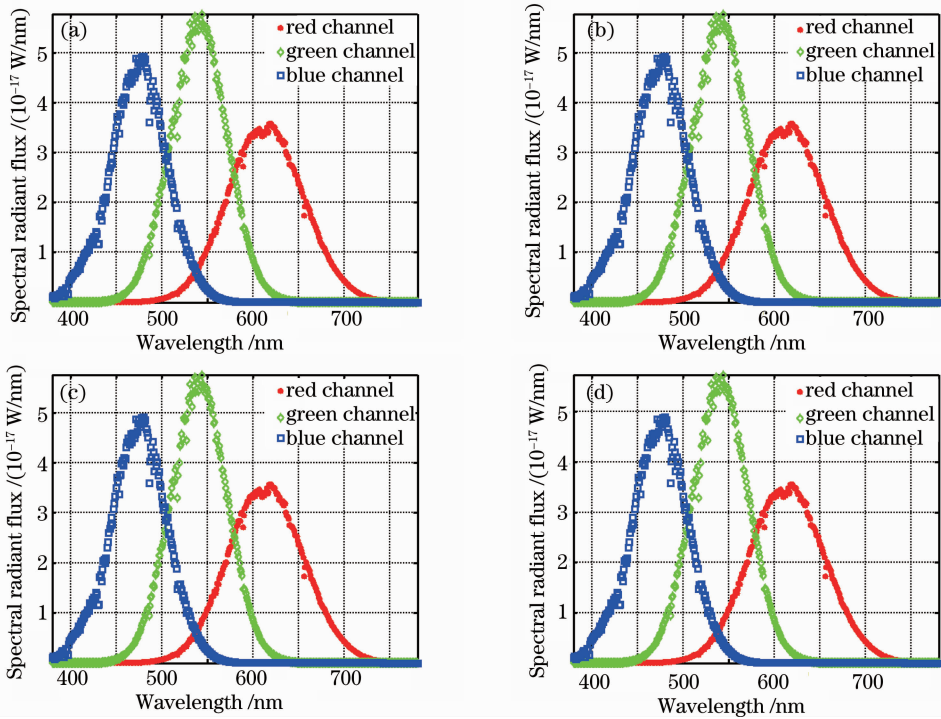


图 8 不同时刻实践二号反射多谱段辐通量。(a) 0.36 s; (b) 0.44 s; (c) 0.52 s; (d) 0.60 s

Fig. 8 Multispectral radiant flux of SJ-2 at different observation time. (a) 0.36 s; (b) 0.44 s; (c) 0.52 s; (d) 0.60 s

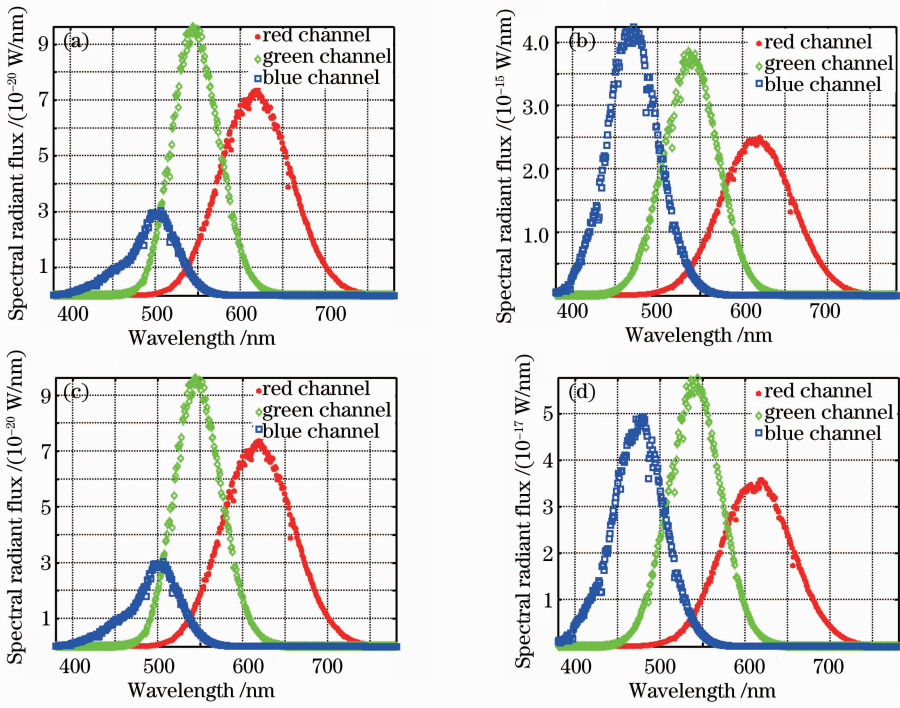


图 9 不同时刻“翻滚”海洋一号反射多光谱辐通量。(a) 1 s; (b) 7.5 s; (c) 15 s; (d) 22.5 s

Fig. 9 Multispectral radiant flux of tumbling HY-1 at different observation time. (a) 1 s; (b) 7.5 s; (c) 15 s; (d) 22.5 s

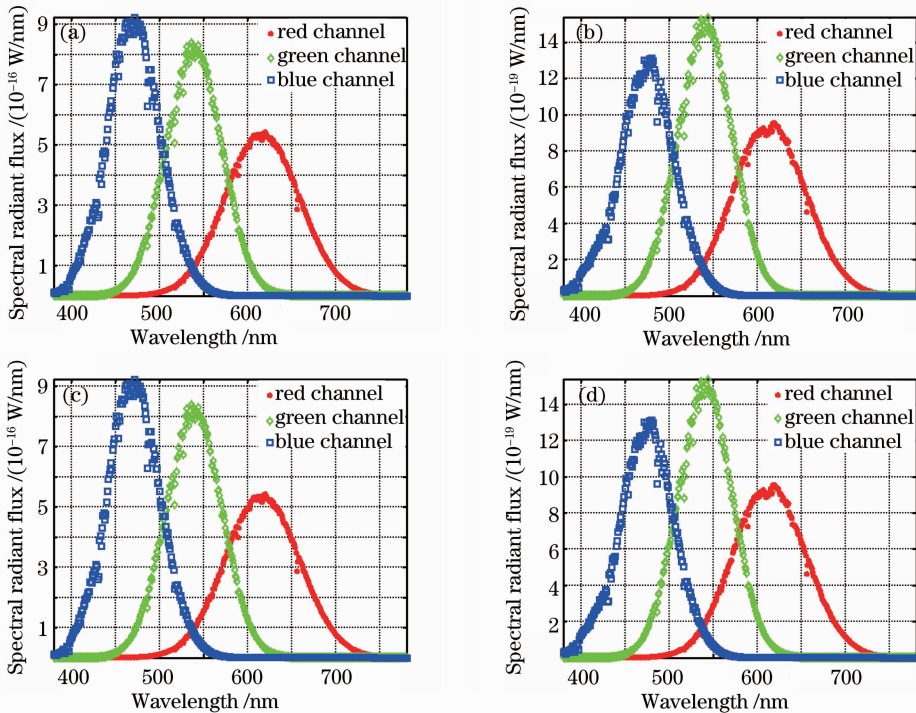


图 10 不同时刻“翻滚”实践二号反射多谱段辐通量。(a) 1 s; (b) 7.5 s; (c) 15 s; (d) 22.5 s

Fig. 10 Multispectral radiant flux of tumbling SJ-2 at different observation time. (a) 1 s; (b) 7.5 s; (c) 15 s; (d) 22.5 s

4 结 论

从卫星的轨道特性、材料特性出发,对运动状态

相关的卫星多谱段光学特性进行了理论分析、建模与测量研究,结合卫星的背景特性、结构特性仿真计

算了运动状态变化对卫星多谱段光学特性的影响。计算结果表明,在较短的观测时段内,三轴稳定卫星反射光学信号变化主要由帆板对日指向运动造成,自旋稳定卫星反射光学信号的变化主要由自身旋转运动造成。由于表面材料的不同,相同“翻滚”周期的三轴稳定和自旋稳定卫星的多谱段光学信号形状存在较大差异。利用卫星反射多谱段光学信号的形状及周期性变化速率等信息,可以进行目标卫星运动状态的辨识,提高卫星的态势感知能力。

参 考 文 献

- 1 Feng Xiaoyong, Zhu Ming, Xiang Zhiqiang. Method of television real-time detection on dark and small stars targets in the daytime [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(4): 1009~1014
冯小勇,朱明,向治强. 白天暗小恒星目标电视实时探测[J]. 光学学报, 2010, **30**(4): 1009~1014
- 2 Li Kexin, Zhang Wei, Cong Mingyu *et al.*. A streak detection algorithm of space target in deep space background [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 445~450
李克新,张伟,丛明煜等. 一种深空背景空间小目标条痕检测算法[J]. 光学学报, 2010, **30**(2): 445~450
- 3 Wan Ming, Zhang Fengming, Hu Shuang. Novel infrared dim and small target detection algorithm based on multi-scale gradient [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(10): 1011001
万明,张凤鸣,胡双. 基于多步长梯度特征的红外弱小目标检测算法[J]. 光学学报, 2011, **31**(10): 1011001
- 4 Wang Fengchao, Liu Xingtang, Huang Shucai. Target fusion detection with multi-feature based on fuzzy evidence theory [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(3): 713~719
王凤朝,刘兴堂,黄树采. 基于模糊证据理论的多特征目标融合检测算法[J]. 光学学报, 2010, **30**(3): 713~719
- 5 Zhang Su, Wang Wensheng. Optical correlation recognition of the moving target in cluttered background [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(1): 0107001
张肃,王文生. 复杂背景下运动目标的光学相关识别[J]. 光学学报, 2012, **32**(1): 0107001
- 6 Wu Zhensen, Dou Yuhong. Visible light scattering and infrared radiation of spatial object [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1250~1254

- 吴振森, 窦玉红. 空间目标的可见光散射与红外辐射 [J]. 光学学报, 2003, **23**(10): 1250~1254
- 7 Wang Hongyuan, Zhang Wei, Wang Zhile. Visible characteristics of space satellite based on n th cosine scattering distribution [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 593~598
汪洪源, 张伟, 王治乐. 基于高次余弦散射分布的空间卫星可见光特性 [J]. 光学学报, 2008, **28**(3): 593~598
- 8 Li Bincheng. Optical characteristic analysis of space target [J]. *Optical Engineering*, 1989, (2): 21~26
李斌成. 空间目标的光学特性分析 [J]. 光学工程, 1989, (2): 21~26
- 9 Bao Wenzhuo, Cong Mingyu, Zhang Wei *et al.*. An optical characteristics calculating method based on surface mesh-creation for space targets [J]. *J. Harbin Institute of Technology*, 2010, **42**(5): 710~715
鲍文卓, 丛明煜, 张伟等. 基于面元网格化的空间目标光学特性计算方法 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2010, **42**(5): 710~715
- 10 Yuan Yan, Sun Chengming, Zhang Xiubao *et al.*. Analysis of influence of attitude variation on visible characteristics of space target [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(9): 2748~2752
袁艳, 孙成明, 张修宝等. 姿态变化对空间目标可见光特性的影响分析 [J]. 光学学报, 2010, **30**(9): 2748~2752
- 11 Zeng Rui, Zhou Lezhu, Li Mingzhi *et al.*. The wide band scattering characteristics analysis of satellite targets in different space attitude conditions [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2009, **45**(1): 42~48
曾瑞, 周乐柱, 李明之等. 姿态变化条件下的典型卫星目标宽带散射特性分析 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 2009, **45**(1): 42~48
- 12 F. E. Nicodemus. Reflectance nomenclature and directional reflectance and emissivity [J]. *Appl. Opt.*, 1970, **9**(6): 1474~1475
- 13 Y. Sun. Statistical ray method for deriving reflection models of rough surfaces [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 2007, **24**(3): 724~744
- 14 C. Schlick. An inexpensive BRDF model for physically based rendering [J]. *Computer Graphics Forum*, 1994, **13**(3): 233~246
- 15 Wang Fugang, Zhang Wei, Wang Hongyuan. Reflection characteristics of on-orbit satellite based on bidirectional reflectance distribution function [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2011, **38**(9): 6~12
王付刚, 张伟, 汪洪源. 基于 BRDF 的在轨卫星反射特性 [J]. 光电工程, 2011, **38**(9): 6~12

栏目编辑: 何卓铭