

文章编号: 0253-2239(2010)09-2748-05

# 姿态变化对空间目标可见光特性的影响分析

袁 艳 孙成明\* 张修宝 赵慧洁 王 潜

(北京航空航天大学精密光机电一体化技术教育部重点实验室, 北京 100191)

**摘要** 空间目标的光散射、光辐射特性除了与其背景环境、几何结构和表面材料等密切相关外,姿态变化对其光学特性也有一定的影响,这种影响在天基观测中尤为明显。就姿态变化对空间目标可见光特性的影响进行了理论分析与建模研究,建立了姿态相关的空间目标可见光特性的理论模型。结合具体的参数,对空间目标环境一号卫星和资源二号卫星在探测视点处的辐照度随姿态的变化进行了数值计算。初步的研究结果表明,姿态变化对空间目标可见光特性的影响不可忽略。建模结果可为空间目标的探测、识别提供理论依据。

**关键词** 空间光学;空间目标;可见光特性;姿态变化;建模与仿真

中图分类号 O432.1;O435.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103009.2748

## Analysis of Influence of Attitude Variation on Visible Characteristics of Space Target

Yuan Yan Sun Chengming Zhang Xiubao Zhao Huijie Wang Qian

(Key Laboratory of Precision Opto-Mechatronics Technology, Ministry of Education, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract** The light scattering and radiation characteristics of space target is related to its background environment, geometric structure and surface material, and also influenced by its attitude variation. The influence is especially prominent in space-based surveillance. The influence of attitude variation on visible-radiation characteristics of space target is modeled on the basis of orbit theory, and the irradiance variation with attitude of HJ-1 and ZY-2 satellites is calculated by the given parameters. The calculation results indicate that the influence of attitude variation is not neglectable. The research could provide theoretical basis for space target detection and recognition.

**Key words** space optics; space target; visible-radiation characteristics; attitude variation; modeling and simulation

## 1 引 言

空间对抗的实质是探测与反探测、识别与反识别的技术较量。在这场高技术的较量中,目标光学特性的研究起着举足轻重的作用,空间目标的精细理论建模技术受到了越来越多的重视。前人的工作已初步建立了空间目标光学特性的计算模型,但这些模型中大都忽略了目标本身的姿态变化特性<sup>[1~3]</sup>。事实上,目标在太空自由飞行时,由于不受地球引力和空气动力的作用,会产生三维姿态变化,这种姿态变化在无稳定装置的空间轻诱饵类假目标上反映相当明显<sup>[4]</sup>。

由于空间目标的姿态变化直接影响其接受到的外部环境照射,从而影响其光散射、辐射特性。本文在前人工作的基础上,建立了姿态相关的空间目标可见光特性的理论模型,并就姿态变化对空间目标可见光特性的影响进行了计算和分析。

## 2 姿态相关的空间目标可见光特性理论基础

### 2.1 目标姿态的坐标描述

为了确定目标表面光线入射方向矢量及观测方

收稿日期: 2009-11-13; 收到修改稿日期: 2009-12-16

基金项目: 长江学者、创新团队发展计划(IRT0705)和中国航天科技集团公司航天科技创新基金资助课题。

作者简介: 袁 艳(1967—),女,教授,主要从事光学遥感探测及其信息处理等方面的研究。

E-mail: yuanyan@buaa.edu.cn

\* 通信联系人。E-mail: sunchengming2008@163.com

向矢量,并根据照明与观测条件进行遮挡判断,建立相关坐标系,并基于背景辐射源目标及探测器(空间机动平台)及的轨道参数进行坐标变换确定它们之间的相互位置关系<sup>[5~7]</sup>。

### 2.1.1 坐标系的建立

如图 1 所示,建立 J2000.0 惯性坐标系  $i-j-k$  及目标本体坐标系  $x-y-z$ 。J2000.0 惯性坐标系  $i-j-k$  以地球质心为坐标原点, J2000.0 地球赤道面为基本平面,  $i$  轴在基本平面内指向 J2000.0 平春分点,  $k$  轴为地球的自转轴, 由地心指向北极,  $j$  轴利用右手法则确定。目标本体坐标系  $x-y-z$  以目标质心为坐标原点, 目标在轨运动方向为  $x$  轴,  $z$  轴为目标质心与地心的连线方向, 指向地心,  $y$  轴利用右手法则确定。

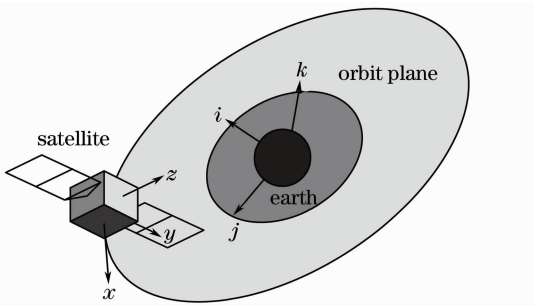


图 1 坐标系示意图

Fig. 1 Diagrammatic sketch of coordinate system

### 2.1.2 位置矢量计算

太阳、目标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

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

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

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

式中  $\mu$  为地球引力常数,  $\mu = 398600.47 \text{ km}^3/\text{s}^2$ ;  $a$  为轨道半长轴;  $e$  为轨道偏心率;  $M$  为平近点角;  $v$  为真近点角;  $r$  为地心距离矢量;  $t$  为观测时刻;  $\tau$  为过近地点时刻,均采用 J2000.0 标准历元起算的儒略计时。

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

$$p = R_z(-\Omega)R_x(-\varphi)R_z(-\omega)p_0, \quad (4)$$

式中  $\varphi$  为轨道倾角,  $\Omega$  为升交点赤经,  $\omega$  为近地点辐

角,  $p_0 = (r \cos v, r \sin v, 0)$ ;  $R_{x,y,z}(\theta)$  为旋转矩阵

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

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

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

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目标本体坐标系

$$q = L_{001}R_z(\omega)R_x(\varphi)R_z(\Omega)p, \quad (5)$$

式中  $q$  为各量在目标本体坐标系中的矢量坐标,  $L_{001}$  为坐标轴的反向变换矩阵

$$L_{001} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

### 2.1.3 光线遮挡判断

在目标本体坐标系中,网格单元  $A_{i,j}$  的光线入射方向矢量  $n_i = (p_x, p_y, p_z)$ , 探测方向矢量  $n_o = (q_x, q_y, q_z)$ , 如图 2 所示,由于两条射线汇聚网格中心点  $(x_{i,j}, y_{i,j}, z_{i,j})$ , 则网格单元的入射角,即  $A_{i,j}$  的法向矢量与光线入射方向矢量的夹角为

$$\theta_i = \arccos[(n_{i,j} \cdot n_i) / (|n_{i,j}| \cdot |n_i|)]. \quad (7)$$

网格单元的探测角,即  $A_{i,j}$  的法向矢量与系统观测方向矢量的夹角为

$$\theta_r = \arccos[(n_{i,j} \cdot n_o) / (|n_{i,j}| \cdot |n_o|)]. \quad (8)$$

两条射线可用参数方程表示为

入射方向为

$$\begin{cases} x = x_{i,j} + p_x t \\ y = y_{i,j} + p_y t \\ z = z_{i,j} + p_z t \end{cases} \quad (9)$$

观测方向为

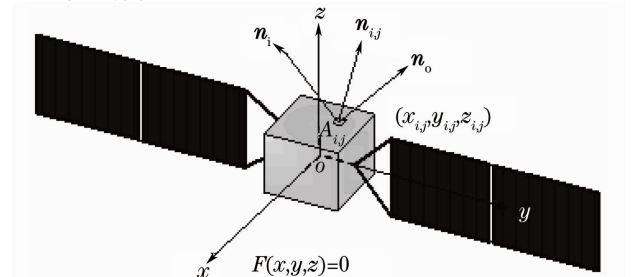


图 2 遮挡分析

Fig. 2 Barrier analysis

$$\begin{cases} x = x_{i,j} + q_x t \\ y = y_{i,j} + q_y t, \\ z = z_{i,j} + q_z t \end{cases} \quad (10)$$

又在本体坐标系中,目标外形平面  $\Sigma$  的函数为

$$F(x, y, z) = 0. \quad (11)$$

于是,面元  $A_{i,j}$  成为目标可见光特性分析的贡献单元,必须同时满足以下两个条件 1)  $\cos \theta_i \geq 0$  且  $\cos \theta_r \geq 0$ ; 即  $\theta_i, \theta_r$  均不大于  $\pi/2$ ;

2) (9)式与(11)式,(10)式与(11)式联立均无解。即网格面元  $A_{i,j}$  的入射光线、出射光线(探测方向)与目标其他表面(网格单元)均无交点。

因此,给定背景辐射源、目标及探测器的轨道参数后,即可求出背景辐射源、探测器在目标本体坐标系下的矢量坐标并根据照明与观测条件进行遮挡判断。

## 2.2 目标可见光特性建模

空间目标的可见光特性可以通过目标在探测器入瞳面上产生的辐照度来描述,目标表面面元与探测器入瞳面的几何位置关系如图 3 所示<sup>[8]</sup>。其中  $\mathbf{n}_{i,j}$  为目标表面面元的法线方向,  $\mathbf{n}_i$  和  $\mathbf{n}_o$  分别为面元上光纤入射方向和观测方向,  $\theta_i$  为入射角,  $\theta_r$  为探测角,  $\mathbf{n}_d$  为探测器入瞳面的法线方向,  $oo'$  为面元与探测器入瞳面的中心连线,其长度  $R$ ,  $\theta_d$  为探测器入瞳面法线  $\mathbf{n}_d$  与其中中心连线  $oo'$  的夹角。

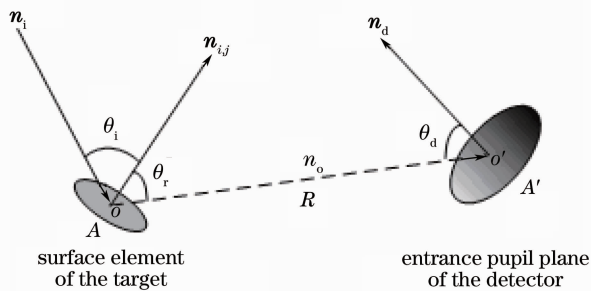


图 3 目标表面面元与探测器入瞳面的几何位置关系

Fig. 3 Geometric relation between target's surface element and entrance pupil plane

### 2.2.1 空间目标对太阳直接辐射的散射特性

由于目标表面面元  $A$  面积很小,因而可以将其看作点源。于是,根据方向反射率的定义及余弦定律,目标表面面元  $A$  被太阳光照射在  $oo'$  方向产生的光谱辐亮度为<sup>[9]</sup>

$$L_p(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) \cdot E_{\text{sun}}(\lambda) \cos \theta_i, \quad (12)$$

式中  $f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)$  为面元  $A$  的方向反射率。

面元  $A$  在  $oo'$  方向产生的光谱辐射强度为

$$I_{d\theta_r} = L_p(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) A \cos \theta_r = f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) E_{\text{sun}}(\lambda) \cos \theta_i \cos \theta_r A. \quad (13)$$

由面元  $A$  发出并落到探测器入瞳面  $A'$  上的辐射通量为

$$\Phi_d = I_{d\theta_r} \Omega_d = f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) \cdot E_{\text{sun}}(\lambda) \cos \theta_i \cos \theta_r \cdot A \Omega_d, \quad (14)$$

式中  $\Omega_d$  为探测器入瞳面  $A'$  对面元  $A$  所张的立体角

$$\Omega_d = A' \frac{\cos \theta_d}{R^2}. \quad (15)$$

根据辐照度的定义,面元  $A$  在探测器入瞳面  $A'$  上产生的光谱辐照度为

$$E_d = \Phi_d / A' = f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) E_{\text{sun}}(\lambda) \cdot \cos \theta_i \cos \theta_r \cos \theta_d \cdot A / R^2. \quad (16)$$

### 2.2.2 空间目标对地球及大气反射太阳辐射的散射特性

地球本身不发光,而是靠反射太阳光而发亮。地球表面及其大气系统对整个太阳辐射的反射有明显的光谱选择性,而且其反射特性与气象条件及地球表面的性质有关。地球反射率的多变状况,给目标的光度计算带来相当大的困难。但是,由于空间目标的飞行高度大、飞行速度快,而且这部分能量比起太阳对目标的直接辐射所占比例又较小,因此在计算时,假设地球为一漫反射体,对太阳辐射的反射遵守朗伯特定律并且各处均匀,反射光谱与太阳光谱相似。地球及其大气系统对太阳光的反射率一般取地球的平均反射率为  $\rho = 0.35$ <sup>[10,11]</sup>。根据(16)式,则目标表面面元  $A$  散射地球及大气反射太阳辐射在探测器入瞳处产生的光谱辐照度为

$$E'_d = f_r(\theta'_i, \varphi'_i, \theta'_r, \varphi'_r, \lambda) \rho E_{\text{sun}}(\lambda) \cdot \cos \theta'_i \cos \theta'_r \cos \theta'_d \cdot A / R^2, \quad (17)$$

式中  $\theta'_i, \theta'_r$  分别为目标表面面元  $A$  的法线方向与地球及大气反射太阳辐射方向、探测器观测方向的夹角。

如目标某一表面  $n$  对太阳直接辐射、地球及大气反射的太阳辐射为“可视表面”,则在可见光波段对(16)~(17)式在目标的整个“可视表面”积分,即得到目标该表面反射背景辐射在探测器入瞳处产生的辐照度  $E_n$  为

$$E_n = \iint (E_d + E'_d) d\lambda dA. \quad (18)$$

对目标各个表面求和可得整个目标反射背景辐射在探测器入瞳处产生的辐照度  $E$  为

$$E = \sum E_n. \quad (19)$$

综上所述,在给定背景辐射源、目标及探测器的轨道参数后,求出背景辐射源、探测器在目标本体坐

标系下的矢量坐标,计算目标表面的光线入射角、探测系统的观测角并分析目标表面间的相互遮挡情况,结合建立的可见光特性的数学模型,即可求得目标反射背景辐射在探测器入瞳处的辐照度。

### 3 姿态变化对可见光特性影响的分析与计算

#### 3.1 姿态变化对可见光特性影响的分析

在轨运行的空间目标姿态时刻处于动态的变化中。如图 4 所示,假定背景辐射源与探测器的位置情况不变,当目标绕  $x$  轴侧滚  $\Delta\theta$  角度时,根据(7)式和(8)式,网格单元的入射角及探测角分别为

$$\theta_i = \arccos[(\mathbf{n}_{i,j} \cdot \mathbf{n}'_i) / (|\mathbf{n}_{i,j}| \cdot |\mathbf{n}'_i|)], \quad (20)$$

$$\theta_r = \arccos[(\mathbf{n}_{i,j} \cdot \mathbf{n}'_o) / (|\mathbf{n}_{i,j}| \cdot |\mathbf{n}'_o|)], \quad (21)$$

式中  $\mathbf{n}'_i = R_x(\Delta\theta) \cdot \mathbf{n}_i, \mathbf{n}'_o = R_x(\Delta\theta) \cdot \mathbf{n}_o$  分别为目标侧滚后网格单元  $A_{i,j}$  的光线入射方向矢量和探测方向矢量。同理利用  $\mathbf{n}'_i = R_y(\Delta\theta) \cdot \mathbf{n}_i, \mathbf{n}'_o = R_y(\Delta\theta) \cdot \mathbf{n}_o$  和  $\mathbf{n}'_i = R_z(\Delta\theta) \cdot \mathbf{n}_i, \mathbf{n}'_o = R_z(\Delta\theta) \cdot \mathbf{n}_o$  可分别计算出目标绕  $y$  轴俯仰  $\Delta\theta$  角度及绕  $z$  轴偏航  $\Delta\theta$  角度时网格单元的入射角  $\theta_i$  和探测角  $\theta_r$ 。

由此,根据所建立的姿态相关的空间目标可见光特性的数学模型,即可求得目标在侧滚、俯仰及偏

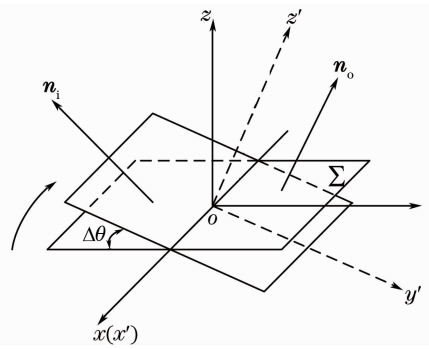


图 4 卫星侧滚示意图

Fig. 4 Schematic diagram of satellite rolling  $\Delta\theta$  角度时,其反射背景辐射在探测器入瞳处的辐照度的变化情况<sup>[12]</sup>。

#### 3.2 姿态变化对可见光特性影响的计算

以空间目标环境一号卫星和资源二号卫星为例,根据目标的几何尺寸、表面物性参数、位置关系等确定输入条件,进行姿态变化对空间目标可见光特性影响的数值仿真计算。其中,所选卫星均为非自旋、三轴稳定卫星,其主要由卫星本体、太阳帆板等部件组成,如图 5 所示。

环境一号卫星和资源二号卫星于 2009 年 6 月 5 日 12:00~20:00 期间,在探测视点处的辐照度随姿态的变化结果如图 6、图 7 所示。



图 5 空间目标。(a)环境一号卫星;(b)资源二号卫星  
Fig. 5 Space targets. (a) HJ-1 satellite; (b) ZY-2 satellite

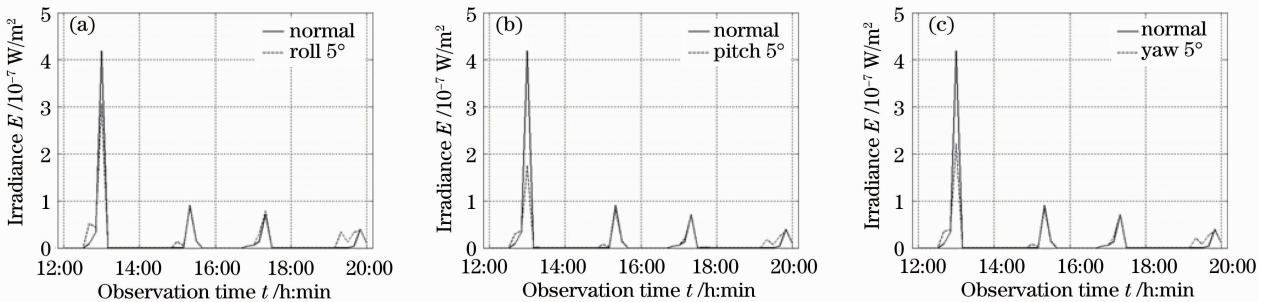


图 6 姿态变化对环境一号卫星可见光特性影响。(a)侧滚 5°;(b)俯仰 5°;(c)偏航 5°  
Fig. 6 Influence of attitude variation on the visible radiation characteristic of HJ-1 satellite. (a) roll 5°; (b) pitch 5°; (c) yaw 5°



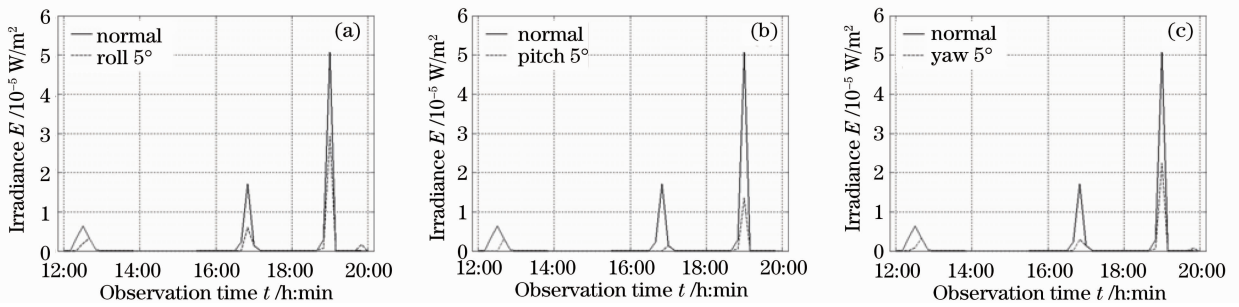


图7 姿态变化对资源二号卫星可见光特性影响。(a)侧滚 $5^\circ$ ;(b)俯仰 $5^\circ$ ;(c)偏航 $5^\circ$

Fig. 7 Influence of attitude variation on the visible radiation characteristic of ZY-2 satellite. (a) roll  $5^\circ$ ; (b) pitch  $5^\circ$ ; (c) yaw  $5^\circ$

由姿态变化对环境一号卫星和资源二号卫星可见光特性影响的计算结果可以看出,在观测时间12:00~20:00内

1) 目标在探测器入瞳处的辐照度在 $10^{-7} \sim 10^{-5}$ 量级,且出现了不同的峰值与零值,即目标的可见光特性具有较强的方向性。这与目标表面覆盖材料及太阳能电池板具有较强的镜反射特征相一致。同时,与目标的外形结构以及目标、太阳、地球三者之间的相互位置有关。也即只有当目标同时满足“被背景光源照射”及“对探测器可见”两个条件时,其对探测器入瞳处的照度才有贡献。

2) 环境一号卫星相对于资源二号卫星在探测器入瞳处的辐照度变化较快,即同样时间间隔内,环境一号卫星的姿态比资源二号卫星的姿态变化速度快,相关文献中各目标的可见光的灰度图像也充分说明了这一点。此外,相比于姿态变化中的侧滚与偏航,俯仰对各目标在探测器入瞳处辐照度的变化影响程度更大。

## 4 结 论

本文就姿态变化对空间目标可见光特性的影响进行了理论分析与建模研究。在此基础上,对比计算了空间目标环境一号卫星和资源二号卫星在探测器入瞳处的辐照度受姿态变化的影响情况。初步的研究表明姿态变化对空间目标可见光特性的影响不可忽略。本文在此研究的基础上提出的基于姿态变化的空间目标可见光特性分析方法可以尝试用作真假目标探测识别的判据。

## 参 考 文 献

- Zhang Wei, Wang Hongyuan, Wang Zhile *et al.*. Modeling method for visible scattering properties of space target [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(12): 2462~2467  
张 伟, 汪洪源, 王治乐 等. 空间目标可见光散射特性建模方法研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(12): 2462~2467
- Wang Hongyuan, Zhang Wei, Wang Zhile. Visible characteristics of space satellite based on nth 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
- 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
- Mao Hongxia, Nan Hua, Ma Jing *et al.*. Analysis of influence of motion of attitude to optical character of space target [J]. *Inf. Laser Engng.*, 2007, **36**(suppl): 411~414  
毛宏霞, 南 华, 马 静 等. 姿态运动对空间目标光学特性的影响分析[J]. *红外与激光工程*, 2007, **36**(suppl): 411~414
- Yu Jianhui, Su Zengli. Analysis of luminosity features of satellites on space-based surveillance [J]. *J. Spacecraft TT&C Technology*, 2006, **25**(1): 52~56  
余建慧, 苏增立. 天基观测目标卫星光度特性分析[J]. *飞行器测控学报*, 2006, **25**(1): 52~56
- Peng Huafeng, Chen Jing, Zhang Bin. Luminant characteristic of space target in space-based opto-electronic telescope [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2006, **33**(12): 9~14  
彭华峰, 陈 鲸, 张 彬. 空间目标在天基光电望远镜中的光度特征研究[J]. *光电工程*, 2006, **33**(12): 9~14
- Liu Yang, Yi Dongyun, Wang Zhengming. Coordinate transformation methods from the inertial system to the centroid orbit system [J]. *Aerospace Control.*, 2007, **25**(2): 4~8  
刘 洋, 易东云, 王正明. 地心惯性坐标系到质心轨道坐标系的坐标转换方法[J]. *航天控制*, 2007, **25**(2): 4~8
- Sun Chengming, Yuan Yan, Zhang Xiubao. Application of BRDF for modeling on the optical scattering characteristics of space target [C]. *SPIE*, 2009, **7383**: 738338
- Sun Chengming, Zhang Wei, Wang Zhile. Application of BRDF for modeling on the visible reflection characteristics of spatial targets [J]. *Optical Technique*, 2008, **34**(5): 750~753  
孙成明, 张 伟, 王治乐. 双向反射分布函数在空间目标可见光反射特性建模中的应用[J]. *光学技术*, 2008, **34**(5): 750~753
- Zhang Jihua, Yao Dongsheng, Tan Bin. Analysis on effect factors of ground-based electro-optic system detection ability on space object [J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1178~1182  
张己化, 姚东升, 谈 斌. 地基光电系统空间目标探测影响因素分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1178~1182
- Zeng Dexiani, Du Xiaoping. Analysis and simulation of characteristics of space objects for space-borne optical sensor [J]. *Chin. J. Space Sci.*, 2008, **28**(6): 560~566  
曾德贤, 杜小平. 空间目标在天基光学探测中的特性分析与仿真[J]. *空间科学学报*, 2008, **28**(6): 560~566
- 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波段散射特性分析[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2009, **45**(1): 42~48