

空间目标天基成像探测信噪比分析

孙成明¹, 袁 艳², 赵 飞¹

(1. 中国科学院光电研究院, 北京 100094 ;

2. 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: 基于光散射理论和轨道动力学, 引入区域分解、网格划分和矢量坐标变换的思想, 利用双向反射分布函数建立了空间目标等效星等的数学模型。结合空间目标天基成像探测的噪声来源建立了空间目标探测信噪比的数学模型。以空间目标天基红外系统为例, 根据目标的结构特性、材料特性、背景特性、轨道特性及探测器的轨道特性、性能参数等, 计算了目标等效星等和目标探测信噪比随时间的变化关系。结果表明, 目标等效星等在观测时间内存在约 3 个星等的差别, 导致目标探测信噪比在观测过程中也随之变化。仿真结果验证了建模方法的正确性, 实现了空间目标天基成像探测信噪比的动态分析。

关键词: 空间光学; 空间目标; 天基成像探测; 等效星等; 信噪比

中图分类号: O432.1; O435.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)05-1654-06

Analysis of SNR for space-based imaging detection of space object

Sun Chengming¹, Yuan Yan², Zhao Fei¹

(1. Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China; 2. Key Laboratory of Precision Opto-mechatronics Technology, Ministry of Education, Beihang University, Beijing 100191, China)

Abstract: According to the optical scattering theory and the orbital dynamics, mathematical model of equivalent magnitude of space object was established with Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) by region classification, grid division and vector coordinates transformation. Combining with the noise resources in space-based imaging detection of space object, mathematical model of Signal-to-Noise Ratio (SNR) was put forward. On the basis of the structure, material, background and orbit parameters of the object and the orbit and performance parameters of the detector, equivalent magnitude and SNR of the Space-Based Infrared System (SBIRS) were calculated. It shows there is about three magnitudes difference in equivalent magnitude during the observation time, which leads to the correlated variation of SNR. The simulation results illustrate the validity of modeling method. The dynamic analysis of SNR for space-based imaging detection of space object is achieved.

Key words: space optics; space object; space-based imaging detection; equivalent magnitude; SNR

收稿日期: 2014-09-16; 修订日期: 2014-10-19

基金项目: 国家自然科学基金(61308101); 长江学者和创新团队发展计划(IRT0705)

作者简介: 孙成明(1984-), 男, 博士, 主要从事空间目标光谱与成像特性测量、建模与仿真等方面的研究。

Email: sunchengming2008@163.com

0 引言

空间目标监视系统的任务是对卫星、碎片等空间目标进行探测与识别,获取目标的形状、尺寸、轨道等特性,并对目标特性数据进行归类和分发。传统的空间目标监视大多采用地基光学望远镜、雷达探测器及无线电信号探测器组成的监视网实现对空间目标的探测与识别。地基监视系统虽然技术成熟、投资成本低,但是易受气象、地域和时间等条件限制。为了提高空间目标监视能力,天基监视系统成为当前研究的热点。天基监视系统通过装载在航天器上的光学、雷达或无线电等有效载荷实现对空间目标的探测与识别。与地基监视系统相比,天基监视系统具有不受气象影响、机动灵活、全天候工作等优势^[1]。作为天基监视系统的有效手段之一,空间目标天基成像探测技术受到越来越多的关注。

信噪比是天基光学载荷的重要技术指标,对天基光学载荷的方案设计与论证具有重要的指导意义。关于信噪比分析,前人做了大量的工作。参考文献[2-5]概述了信噪比计算的基本方法,基于漫反射理论分析了空间目标探测信号,结合噪声来源分析了空间目标探测噪声,推导了空间目标探测信噪比的一般表达式,基于假定简化参数计算了空间目标探测信噪比。然而,空间目标表面既非理想的漫反射面,也非理想的镜反射面,而是兼具漫反射与镜反射特征。因此,基于漫反射理论进行空间目标探测信号分析不够准确。此外,在轨运行的空间目标探测信噪比时刻处于动态的变化中,与目标的光照条件及探测条件有关,因此,基于假定简化参数进行空间目标探测信噪比计算,不能实际地反映空间目标某时刻、多角度的在轨特性,为真实而准确地检测与评估天基光学载荷的性能增加了难度。

文中在空间目标探测信噪比理论建模通用框架研究成果的基础上,利用能精确描述目标表面反射特性的双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)进行了空间目标探测信号分析,通过矢量坐标变换确定了目标的光照条件及探测条件,建立了空间目标等效星等的数学模型。结合空间目标天基成像探测的噪声来源建立了空间目标探测信噪比的数学模型。以空间目

标天基红外系统(Space-Based Infrared System, SBIRS)为例,进行了目标等效星等和目标探测信噪比的仿真计算。建模与仿真结果可为天基光学载荷的方案设计与论证及性能检测与评估提供技术支撑。

1 理论建模

根据目标的结构特性、材料特性、背景特性、轨道特性及探测器的轨道特性等,确定目标在探测器入瞳处产生的能量,确定目标等效星等。根据探测器的性能参数,结合噪声来源,确定目标在探测器像面上产生的信号和噪声,确定目标探测信噪比。

1.1 等效星等建模

1.1.1 入瞳能量

传统的将目标表面看作朗伯面的建模方法,对于实际应用存在一定的局限。随着研究工作的不断深入,发现BRDF能精确描述目标表面反射特性。BRDF是由Nicodemus^[6]于1965年提出的,是从辐射度学出发、在几何光学的基础上描述表面反射特性的物理量,定义为光辐射的反射辐亮度和入射辐照度的比值,如图1所示。

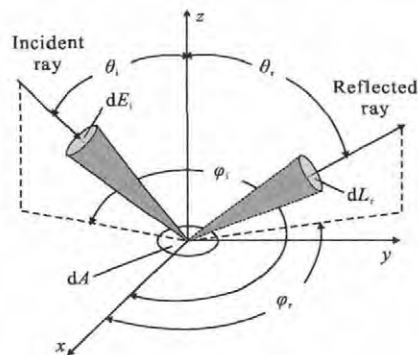


图1 BRDF定义几何示意图

Fig.1 BRDF geometry

数学表达式为:

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

式中: θ_i, φ_i 为入射天顶角和方位角; θ_r, φ_r 为反射天顶角和方位角; λ 为波长; dE_i 和 dL_r 为入射辐照度和反射辐亮度。

笔者前期测量和模拟了多种目标表面材料的BRDF特性^[7],结合目标的结构特性等分析了目标在不同观测条件下的反射特性^[8],取得了较为理想的结果。因此,利用BRDF计算入瞳能量。

基于目标的结构特性、材料特性,对目标表面进行区域分解和网格划分,如图 2 所示。基于太阳、目标和探测器的轨道特性,通过矢量坐标变换,确定三者之间的相互位置关系,确定目标表面面元的光照方向和探测方向。利用 BRDF 计算每个面元在探测器入瞳处产生的能量,最后将所有的面元分量叠加,得到整个目标在探测器入瞳处产生的能量。

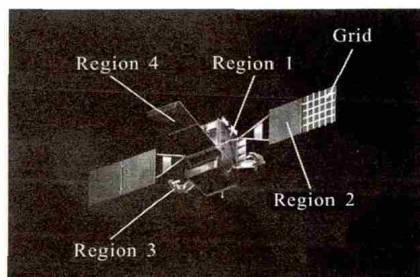


图 2 区域分解和网格划分

Fig.2 Region classification and grid division

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。其中, n 为目标表面面元的法线方向, n_i 和 n_r 为光照方向和探测方向, n' 为探测器入瞳面的法线方向, oo' 为目标表面面元与探测器入瞳面的中心连线, θ_d 为探测器的偏角。

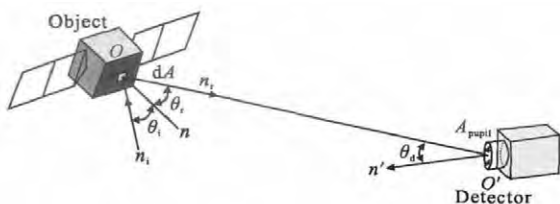


图 3 面元探测几何示意图

Fig.3 Surface element detection geometry

太阳、目标和探测器相对地球的运动遵循开普勒定律,在 J2000.0 惯性坐标系中的矢量坐标为:

$$p = R_z(-\Omega)R_x(-i)R_z(-\omega)p_0 \quad (2)$$

式中: i 为倾角; Ω 为升交点赤经; ω 为近地点辐角; $p_0 = (rcosv, rsinv, 0)$, r 为地心距离, v 为真近点角; $R_i(\theta)$ 为旋转矩阵。

将 J2000.0 惯性坐标系中的矢量坐标转换到目标本体坐标系为:

$$q = L_{001}R_z(\omega_0)R_x(i_0)R_z(\Omega_0)(p-p_0) \quad (3)$$

式中: i_0, Ω_0, ω_0 为目标的轨道参数; p_0 为目标在 J2000.0 惯性坐标系中的矢量坐标; L_{001} 为坐标轴的反向变换矩阵。

由此,得到目标在轨运行过程中实时变化的光照方向 n_i 和探测方向 n_r ,进而得到相应的 θ_i 和 θ_r 。

由 BRDF 定义,面元 dA 反射太阳辐射在 n_r 方向上的辐亮度为:

$$L(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)E_{\text{sun}}(\lambda)\cos\theta_i \quad (4)$$

式中: $E_{\text{sun}}(\lambda)$ 为面元 dA 处的太阳辐照度。

面元 dA 在 n_r 方向上的辐强度为:

$$dI(\lambda) = L(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)dA\cos\theta_r \quad (5)$$

面元 dA 在探测器入瞳处的辐通量为:

$$d\Phi_{\text{pupil}}(\lambda) = dI(\lambda)d\Omega \quad (6)$$

式中: $d\Omega$ 为探测立体角。

$$d\Omega = A_{\text{pupil}}\cos\theta_d/R^2 \quad (7)$$

对公式(6)在目标“可视表面”积分,得到整个目标在探测器入瞳处的辐通量为:

$$\Phi_{\text{pupil}}(\lambda) = \iint f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)E_{\text{sun}}(\lambda) \cdot$$

$$\cos\theta_i\cos\theta_r\cos\theta_d A_{\text{pupil}}dA/R^2 \quad (8)$$

由辐照度定义,得到目标在探测器入瞳处的辐照度为:

$$E_{\text{pupil}}(\lambda) = \Phi_{\text{pupil}}(\lambda)/A_{\text{pupil}} = \iint f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda)E_{\text{sun}}(\lambda) \cdot$$

$$\cos\theta_i\cos\theta_r\cos\theta_d A_{\text{pupil}}dA/R^2 \quad (9)$$

1.1.2 等效星等

取太阳为参考星,等效星等为 -26.74,对应的辐照度为 E_{sun} ,则辐照度为 E_{pupil} 的空间目标的等效星等 M_v 为:

$$M_v = -26.74 - 2.5\lg(E_{\text{pupil}}/E_{\text{sun}}) \quad (10)$$

1.2 信噪比建模

信噪比(以电子数为单位)定义为:

$$SNR = \frac{N_{\text{signal}}}{N_{\text{noise}}} \quad (11)$$

式中: N_{signal} 为探测器接收的目标信号电子数; N_{noise} 为探测器接收的总的噪声电子数。

1.2.1 信号

根据入瞳能量计算,目标在探测器像面上的辐通量为:

$$\Phi_{\text{image}}(\lambda) = \tau\Phi_{\text{pupil}}(\lambda) \quad (12)$$

式中: τ 为探测器的透率。

探测器接收的目标信号电子数速率为:

$$R_{\text{signal}} = \int \lambda\Phi_{\text{image}}(\lambda)/hcd\lambda \quad (13)$$

探测器像元接收的目标信号电子数为:

$$N_{\text{signal}} = \frac{QtR_{\text{signal}}}{n_{\text{pixel}}} \quad (14)$$

式中: Q 为探测器的量子效率; t 为探测器的曝光时间; n_{pixel} 为目标像的像元数。

1.2.2 噪声

空间目标天基成像探测的噪声来源包括光子噪声、热噪声、读出噪声和 $1/f$ 噪声等。总的噪声电子数为:

$$N_{\text{noise}} = \sqrt{n_{\text{ph}}^2 + n_{\text{th}}^2 + n_{\text{ro}}^2 + n_{1/f}^2} \quad (15)$$

式中: n_{ph} 为光子噪声; n_{th} 为热噪声; n_{ro} 为读出噪声; $n_{1/f}$ 为 $1/f$ 噪声。

(1) 光子噪声

光子噪声包括目标辐射光子噪声和背景辐射光子噪声。

$$n_{\text{ph}}^2 = N_{\text{signal}} + N_{\text{background}} \quad (16)$$

式中: $N_{\text{background}}$ 为探测器像元接收的背景噪声电子数。

背景的亮度约为 $22 \text{ mag/arcsec}^{2[9]}$, 则探测器接收的背景亮度为:

$$m_v = 22 - 2.5 \lg(\Omega_{\text{FOV}}^2) \quad (17)$$

式中: Ω_{FOV} 为探测器的视场角。

探测器接收的背景信号电子数速率为:

$$R_{\text{background}} = R_{\text{signal}} \times 10^{0.4(M_v - m_v)} \quad (18)$$

探测器像元接收的背景噪声电子数为:

$$N_{\text{background}} = \frac{QtR_{\text{background}}}{N_{\text{pixel}}} \quad (19)$$

式中: N_{pixel} 为探测器的总的像元数。

(2) 热噪声

热噪声为:

$$n_{\text{th}}^2 = \frac{4kTt}{q^2 R_0} \quad (20)$$

式中: T 为探测器的绝对温度; q 为电荷量; R_0 为有效负载电阻。

(3) 读出噪声

读出噪声为:

$$n_{\text{ro}}^2 = \frac{v_{\text{ro}}^2 C_{\text{int}}^2}{q^2} \quad (21)$$

式中: v_{ro} 为探测器的读出噪声电压; C_{int} 为探测器的等效积分电容。

(4) $1/f$ 噪声

$1/f$ 噪声为:

$$n_{1/f}^2 = \frac{I_{1/f}^2 t^2}{q^2} \quad (22)$$

式中: $I_{1/f}$ 为探测器的噪声电流。

1.2.3 信噪比

根据信号和噪声计算, 目标探测信噪比为:

$$SNR = \frac{N_{\text{signal}}}{\sqrt{N_{\text{signal}} + N_{\text{background}} + \frac{4kTt}{q^2 R_0} + \frac{v_{\text{ro}}^2 C_{\text{int}}^2}{q^2} + \frac{I_{1/f}^2 t^2}{q^2}}} \quad (23)$$

综上, 给定目标的结构特性、材料特性、背景特性、轨道特性及探测器的轨道特性、性能参数等, 便可计算目标等效星等和目标探测信噪比随时间的变化关系。

2 仿真计算

以空间目标 SBIRS 为例, 进行目标等效星等和目标探测信噪比计算。

2.1 仿真参数

(1) 物性参数

现有 BRDF 模型包括 Davies 模型、Torrance-Sparrow 模型、Cook-Torrance 模型等。根据目标表面状况, 选取 Davies 模型^[10]。该模型综合了镜反射分量和漫反射分量, 适用条件为: $\sigma/(\text{acos}\theta_i) < 0.2$ 且 $\sigma/\lambda < 2$, 表达式如公式(24)所示:

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = \frac{1775\rho}{\pi \cos\theta_i} \exp\left[-\left(4\pi \frac{\sigma}{\lambda} \cos\theta_i\right)^2\right] + \frac{\rho\pi^3}{\cos\theta_i \cos\theta_r} (\cos\theta_i + \cos\theta_r)^4 \left(\frac{a}{\lambda}\right)^2 \left(\frac{\sigma}{\lambda}\right)^2 \cdot \exp\left[-\left(\frac{\pi a}{\lambda}\right)^2 (\sin^2\theta_i + \sin^2\theta_r + 2\sin\theta_i \sin\theta_r \cos(\varphi_i - \varphi_r))\right] \quad (24)$$

式中: σ 为表面粗糙度均方根; a 为表面自相关长度; ρ 为表面反射率。

目标的物性参数如表 1 所示。

表 1 物性参数

Tab.1 Physical parameters

Object	Region	Dimension/mm	Material properties			
			Type	$\sigma/\mu\text{m}$	$a/\mu\text{m}$	$\rho/\mu\text{m}$
SBIRS	Body	2100×2100×5800	Polyester film	0.02	0.85	0.9
			GaAs (Front)	0.13	2.14	0.3
	Sail	4200×3900	Black paint (Back)	1.08	7.97	0.07

(2) 轨道参数

目标和探测器的轨道参数如表 2 所示。

表 2 轨道参数
Tab.2 Orbital parameters

	a/km	e	$i/(^{\circ})$	$\Omega/(^{\circ})$	$\omega/(^{\circ})$	τ
Object	42 166.3	0.000 623	5.522	320.556	291.856	00:00
Detector	37 251.7	0.129 038	5.299	320.495	334.369	00:00

(3) 性能参数

探测器的性能参数如表 3 所示。

表 3 性能参数
Tab.3 Performance parameters

Parameter	Value
Entrance pupil diameter/mm	150
Focal length/mm	600
Transmittance	0.6
Pixel size/ μm	15×15
Pixel number	1 024×1 024
Quantum efficiency	0.7
Exposure time/s	0.1

2.2 仿真结果

2013 年 11 月 18 日 22:45:00~23:15:00 期间,目标等效星等和目标探测信噪比的仿真结果如图 4、图 5 所示。结果表明,目标等效星等在观测时间内存在约 3 个星等的差别,导致目标探测信噪比在观测过程中也随之变化。

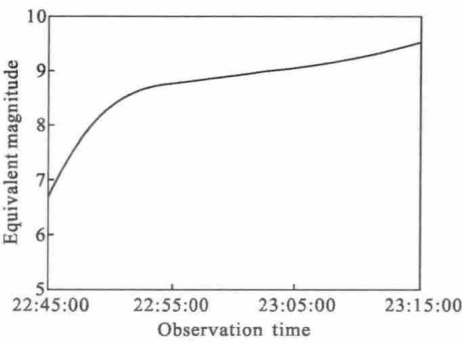


图 4 目标等效星等

Fig.4 Equivalent magnitude of the SBIRS

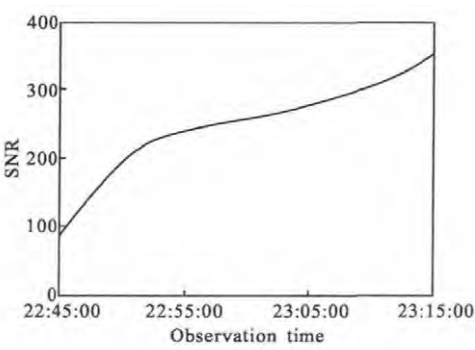


图 5 目标探测信噪比

Fig.5 SNR of the SBIRS

3 结 论

基于光散射理论和轨道动力学,对空间目标天基成像探测信噪比进行了理论建模与仿真计算。仿真结果验证了建模方法的正确性,实现了空间目标天基成像探测信噪比的动态分析。为了提高目标探测信噪比,可将探测器和转角装置相结合,对目标进行随动跟踪,延长曝光时间;采用光学全反射成像系统,提高光学系统的透过率,增大光学系统接收的能量,提高目标背景对比度;对热噪声进行限制,使之小于光子噪声等。

参考文献:

[1] Zhou Yanping, Shu Rui, Tao Kunyu, et al. Study of photoelectric detecting and identifying of space target [J]. *Optical Technique*, 2007, 33(1): 68-73. (in Chinese)
周彦平, 舒锐, 陶坤宇, 等. 空间目标光电探测与识别技术的研究[J]. 光学技术, 2007, 33(1): 68-73.

[2] Wan Zhi, Ren Jianwei, Li Xiansheng, et al. Analysis of signal-to-noise ratio for remote sensing TDI CCD camera based on radiative transfer model [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 497-500. (in Chinese)
万志, 任建伟, 李宪圣, 等. 基于辐射传输模型的 TDI CCD 遥感相机信噪比分析 [J]. 红外与激光工程, 2008, 37(3): 497-500.

[3] Chen Xinjin, Yuan Yan, Li Liying, et al. Analysis of signal-to-noise ratio for target detection [J]. *Journal of Applied Optics*, 2007, 28(4): 397-400. (in Chinese)
陈新锦, 袁艳, 李立英, 等. 目标探测的信噪比分析 [J]. 应用光学, 2007, 28(4): 397-400.

[4] Yang Fan, Xuan Yimin, Han Yuge. Analysis of SNR for ground-based infrared detection of space object [J]. *Infrared*

- and Laser Engineering*, 2012, 41(11): 2879–2885. (in Chinese)
杨帆, 宣益民, 韩玉阁. 空间目标红外地基探测的信噪比分析 [J]. 红外与激光工程, 2012, 41(11): 2879–2885.
- [5] Zhang Keke, Fu Danying, Zhou Feng, et al. The study on detect ability calculation method of space object visible camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2006, 27(4): 22–26. (in Chinese)
张科科, 付丹鹰, 周峰, 等. 空间目标可见光相机探测能力理论计算方法研究 [J]. 航天返回与遥感, 2006, 27(4): 22–26.
- [6] Nicodemus F E. Directional, reflectance and emissivity of an opaque surface [J]. *Applied Optics*, 1965, 4: 767–773.
- [7] Yuan Yan, Sun Chengming, Zhang Xiubao. Measuring and modeling of the spectral bidirectional reflection distribution function of space target's surface material [J]. *Acta Physica Sinica*, 2009, 59(3): 2097–2103. (in Chinese)
袁艳, 孙成明, 张修宝. 空间目标表面材料光谱双向反射分布函数测量与建模 [J]. 物理学报, 2009, 59(3): 2097–2103.
- [8] Sun C M, Yuan Y, Zhang X B. Application of BRDF for modeling on the optical scattering characteristics of space target [C]//SPIE, 2009, 7383: 738338–1–10.
- [9] Chen Weizhen, Zhang Chunhua, Zhou Xiaodong. A study on luminosity features and signal noise ratio of space target [J]. *Infrared Technology*, 2007, 29(12): 716–719. (in Chinese)
陈维真, 张春华, 周晓东. 空间目标的光度特性及其成像信噪比研究 [J]. 红外技术, 2007, 29(12): 716–719.
- [10] Shen Y J, Zhang Z M, Tsai B K, et al. Bidirectional reflectance distribution function of rough silicon wafers [J]. *International Journal of Thermophysics*, 2001, 22(4): 1311–1326.