

天基空间目标光学散射特性建模与验证

孙成明^{1,2*}, 袁艳³, 吕群波^{1,2}

¹中国科学院光电研究院, 北京 100094;

²中国科学院计算光学成像技术重点实验室, 北京 100094;

³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 为了提高天基空间目标光学散射特性的计算精度, 提出了一种天基空间目标光学散射特性的精确建模与验证方法。综合考虑目标的背景辐射环境、表面材料属性、几何结构尺寸、运行轨道要素等因素, 通过有限元分析和矢量坐标变换, 利用双向反射分布函数建立了目标光学散射特性的数学模型。基于目标光学散射特性测量平台, 进行了低温真空环境下目标光学散射特性数学模型的实验验证。结果表明, 目标散射辐照度的理论建模结果与实验测量结果基本一致, 均方误差优于 9.57%。实验结果验证了建模方法的正确性。

关键词 散射; 空间目标; 散射特性; 双向反射分布函数

中图分类号 O432.1; O435.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201939.1129001

Modeling and Verification of Space-Based Optical Scattering Characteristics of Space Objects

Sun Chengming^{1,2*}, Yuan Yan³, Lü Qunbo^{1,2}

¹Academy of Opto-Electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

²Key Laboratory of Computational Optical Imaging Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

³Key Laboratory of Precision Opto-Mechatronics Technology, Ministry of Education,

Beihang University, Beijing 100191, China

Abstract An accurate modeling and verification method is proposed to improve the calculation precision of space-based optical scattering characteristics of space objects. Further, a mathematical model is established for space-based optical scattering characteristics using the bidirectional reflectance distribution function via finite element analysis and vector coordinate transformation based on the object background radiation, surface material properties, geometric dimension, and orbit elements. Subsequently, this model is experimentally verified in a low-temperature and vacuum environment using the measurement platform of the optical scattering characteristics; the modeling data agrees well with the measured data, and the mean square errors are lower than 9.57%, demonstrating the validity of the proposed method.

Key words scattering; space object; scattering characteristics; bidirectional reflectance distribution function

OCIS codes 350.6090; 240.3695; 290.5825; 290.1483; 290.5820

1 引 言

天基空间目标监视系统通过搭载在航天器上的光学载荷、雷达或无线电载荷等来探测和识别空间目标。与地基监视系统相比, 天基监视系统不受气象、地域和时间等条件的限制, 可实现全天时工作, 是空间态势感知技术领域建设的重要方向^[1]。可见光探测作为天基监视手段之一, 具有分辨率高、直观

清晰、易于识别等优点, 是非常理想的天基探测方式。而天基空间目标光学散射特性的精确建模与验证方法, 作为天基可见光探测的理论基础与技术支撑, 必然成为空间光电载荷方案设计与论证的迫切需求。空间目标在大气层外 3.5 K 的空间背景下运行, 光学散射特性受到太阳直接辐射和地球反射太阳辐射等背景特性、表面反射率等材料特性、几何尺寸和轮廓形状等结构特性、空间位置关系等轨道特

收稿日期: 2019-04-25; 修回日期: 2019-06-28; 录用日期: 2019-07-15

基金项目: 国家自然科学基金(61635002)、教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT0705)

* E-mail: sunchengming2008@163.com

性的综合影响。前期工作已建立了多种空间目标光学散射特性的计算模型,并进行了相关的仿真测量。但其中大部分都是基于假定的朗伯漫反射或是典型的双向反射分布函数(BRDF)模型进行的分析,以及基于简化的平台条件开展的验证^[2-4],不能真实地反映空间目标某时刻、多角度的在轨特性,难以真实而准确地检测和评估空间光电载荷的性能。因此,关于天基空间目标光学散射特性面向应用的一些新方法还有待深入研究。

本文在以往研究的基础上,基于目标的背景特性、材料特性、结构特性及轨道特性,对天基空间目标光学散射特性进行系统的理论分析与建模研究,并就模型的正确性和精度进行验证评估。建模与验证方法可为天基空间目标光学探测与识别提供理论依据和数据参考。

2 理论建模

2.1 理论因素

2.1.1 背景特性

天基空间目标背景辐射主要来自太阳直接辐射,其次来自地球反射太阳辐射,极少来自月球及其他行星反射太阳辐射等,如图 1 所示。

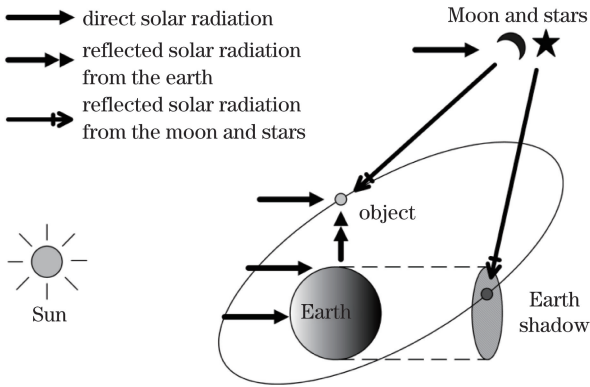


图 1 目标背景辐射示意图

Fig. 1 Diagram of background radiation of object

2.1.2 材料特性

光线经目标表面后的反射,既不是绝对的镜面反射,也不是完全的漫反射,而是在半球空间既有镜面反射分量又有漫反射分量的散射。1965 年, Nicodemus^[5]从辐射度学出发,在几何光学的基础上提出了 BRDF 的概念,将镜面反射和漫反射有机地统一起来,有效地描述了目标表面对光线散射的空间分布。BRDF 定义为光辐射的反射辐亮度和入射辐照度的比值,如图 2 所示,其数学表达式为

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

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

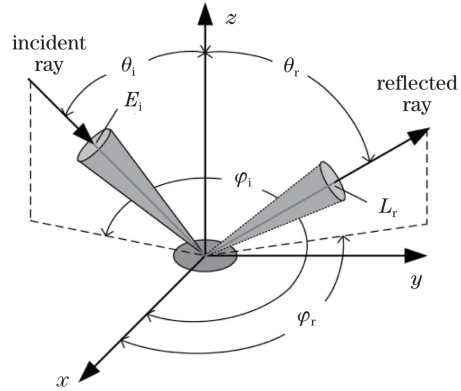


图 2 BRDF 示意图

Fig. 2 Schematic of BRDF

国内外诸多研究机构测试和评估了多种材料的 BRDF 特性^[6-9],现有 BRDF 模型包括 Davies 模型、Torrance-Sparrow 模型、Cook-Torrance 模型等。当前的问题在于 BRDF 的建模与参量优化,即不同研究者采用不同的 BRDF 模型进行计算分析,得出的结论也不同,不易于对研究成果进行比对和评判。BRDF 是由材料本身特性决定的,是材料表面反射率、粗糙度、纹理分布等特性及波长的复杂函数,应用纯理论推导方法会导致参量获取难、建模精度低、应用范围窄等问题。基于实测数据反演的五参量模型具有速度快、精度高、适应性强等特点,其数学表达式为

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r) = k_j \left[\frac{k_w^2 \cos \alpha}{1 + (k_w^2 - 1) \cos \alpha} \cdot \exp[b \cdot (1 - \cos \gamma)^a] \cdot \frac{G(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)}{\cos \theta_i \cos \theta_r} \right] + \frac{k_m}{\cos \theta_i}, \quad (2)$$

式中:等式右边第一项表示镜面反射分量;等式右边第二项表示漫反射分量; $k_w^2 \cos \alpha / [1 + (k_w^2 - 1) \cos \alpha]$ 为面元法线分布函数; $\exp[b \cdot (1 - \cos \gamma)^a]$ 为非涅耳反射函数; $G(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r)$ 为遮蔽函数; k_j, k_w, b, a, k_m 为待定参量。其中: k_j 和 k_m 分别反映镜面反射分量和漫反射分量的大小,与材料表面反射率和粗糙度有关; k_w 反映材料表面斜率分布,与材料表面粗糙度和纹理分布有关; b 和 a 反映材料表面非涅耳反射函数,与材料折射率有关。

2.1.3 结构特性

按照目标表面材料不同的属性和分布,采用区

域分解与网格划分对目标表面进行有限元分析,如图3所示。分解后的区域采用表面方程和约束方程进行数学描述。其中,表面方程描述分解区域的轮廓形状,约束方程描述分解区域的空间位置及几何尺寸。

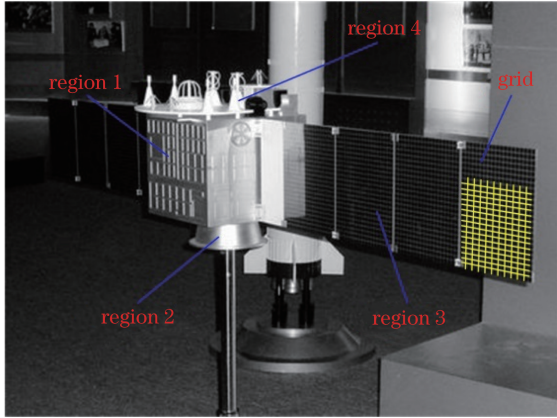


图3 区域分解与网格划分
Fig. 3 Region classification and grid division

表面方程的通用表达式为

$$F(x, y, z) = 0, \quad (3)$$

约束方程的通用表达式为

$$x_{\min} < x < x_{\max}, y_{\min} < y < y_{\max}, z_{\min} < z < z_{\max}, \quad (4)$$

式中: $x_{\min}, x_{\max}, y_{\min}, y_{\max}, z_{\min}, z_{\max}$ 分别为分解区域在 x, y, z 方向上的起止位置。

划分后的网格近似为一个大小均匀且几何尺度大于背景辐射波长的小平面,每个网格都由一个包括中心坐标、法线方向、面积等的特征量表征。由于部分网格之间存在遮挡和掩蔽现象^[10],如图4所示,故需要对目标“可视表面”进行分析。

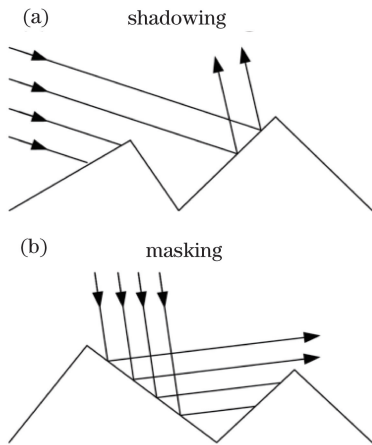


图4 遮挡和掩蔽现象分析。(a)遮挡;(b)掩蔽
Fig. 4 Phenomena of shadowing and masking.
(a) Shadowing; (b) masking

目标表面面元探测的几何位置关系如图5所示。其中, \mathbf{n} 和 \mathbf{n}' 分别为目标表面面元和探测器入瞳面的法线方向, \mathbf{n}_i 和 \mathbf{n}_r 分别为目标表面面元的光照方向和探测方向, OO' 为目标表面面元与探测器入瞳面的中心连线, θ_d 为探测器入瞳面的偏角。

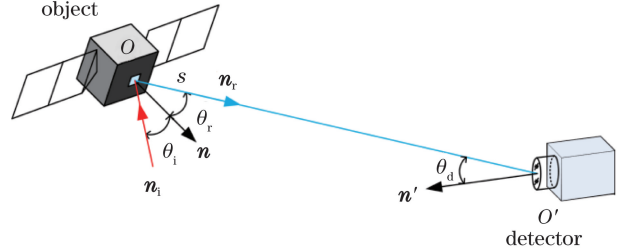


图5 面元探测示意图
Fig. 5 Schematic of surface cell detection

若面元 s 中心坐标为 (x_c, y_c, z_c) , 光照方向为 $\mathbf{n}_i = (q_{ix}, q_{iy}, q_{iz})$, 探测方向为 $\mathbf{n}_r = (q_{rx}, q_{ry}, q_{rz})$, 则光照方向和探测方向可分别表示为

$$\begin{cases} x = x_c + tq_{ix} \\ y = y_c + tq_{iy} \\ z = z_c + tq_{iz} \end{cases}, \quad (5)$$

$$\begin{cases} x = x_c + tq_{rx} \\ y = y_c + tq_{ry} \\ z = z_c + tq_{rz} \end{cases}, \quad (6)$$

式中: t 为参数。

于是,面元 s 成为目标光学散射特性分析的贡献单元,需满足以下两个条件:

1) $\cos \theta_i \geq 0, \cos \theta_r \geq 0$ 且 $\cos \theta_d \geq 0$, 即 $\theta_i, \theta_r, \theta_d$ 均不大于 $\pi/2$;

2) (3)式与(5)式、(3)式与(6)式联立均无解,即面元 s 的光照方向、探测方向不被目标其他表面(网格单元)遮挡和掩蔽。

2.1.4 轨道特性

根据开普勒定律,太阳、目标和探测器在 J2000.0 惯性坐标系中的矢量坐标为

$$\mathbf{p} = \mathbf{R}_z(-\Omega') \mathbf{R}_x(-i') \mathbf{R}_z(-\omega') \mathbf{p}', \quad (7)$$

式中: i' 为倾角; Ω' 为升交点赤经; ω' 为近地点辐角; $\mathbf{p}' = (r' \cos v', r' \sin v', 0)$; r' 为地心距离; v' 为真近点角; $\mathbf{R}_x, \mathbf{R}_z$ 为旋转矩阵。

将矢量坐标由 J2000.0 惯性坐标系转换到目标本体坐标系后,坐标变为

$$\mathbf{q} = \mathbf{L}_{001} \mathbf{R}_z(\omega_o) \mathbf{R}_x(i_o) \mathbf{R}_z(\Omega_o) (\mathbf{p} - \mathbf{p}_o), \quad (8)$$

式中: i_o, Ω_o, ω_o 为目标的轨道参数; \mathbf{p}_o 为目标在 J2000.0 惯性坐标系中的矢量坐标; \mathbf{L}_{001} 为坐标轴的反向变换矩阵。

由此,得到目标在天基探测过程中实时变化的光照方向 \mathbf{n}_i 和探测方向 \mathbf{n}_r ,进而得到相应的 θ_i, θ_r 和 θ_d 。

2.2 建模方法

2.2.1 空间目标对太阳直接辐射的散射特性

根据 BRDF 定义,在 \mathbf{n}_r 方向上面元 s 散射太阳直接辐射产生的辐亮度为

$$L(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) = f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) E_{\text{sun}}(\lambda) \cos \theta_i, \quad (9)$$

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

在 \mathbf{n}_r 方向上面元 s 产生的辐强度为

$$I(\lambda) = L(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) A \cos \theta_r, \quad (10)$$

式中: A 为面元 s 的面积。

在探测器入瞳处面元 s 产生的辐通量为

$$\Phi_{\text{pupil}}(\lambda) = I(\lambda) \Omega, \quad (11)$$

式中: Ω 为探测立体角,表示为

$$\Omega = A_{\text{pupil}} \cos \theta_d / R^2, \quad (12)$$

其中 A_{pupil} 为探测器入瞳的面积, R 为探测距离。

根据辐照度定义,在探测器入瞳处面元 s 产生的辐照度为

$$E_{\text{pupil}}(\lambda) = \Phi_{\text{pupil}}(\lambda) / A_{\text{pupil}} = f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) E_{\text{sun}}(\lambda) \cos \theta_i \cos \theta_r \cos \theta_d A / R^2. \quad (13)$$

2.2.2 空间目标对地球反射太阳辐射的散射特性

地球表面对太阳辐射的反射具有显著的波段选择性,其反射率与地球表面的性质及大气条件有关^[11]。根据(13)式,在探测器入瞳处面元 s 散射地球反射太阳辐射产生的辐照度为

$$E'_{\text{pupil}}(\lambda) = f_r(\theta'_i, \varphi'_i, \theta_r, \varphi_r, \lambda) \rho(\lambda) \times E_{\text{sun}}(\lambda) \cos \theta'_i \cos \theta_r \cos \theta_d A / R^2, \quad (14)$$

式中: θ'_i 和 φ'_i 分别为地球反射太阳辐射的入射天顶角和方位角; $\rho(\lambda)$ 为地球行星反射率。

由于月球及其他行星表面反射率较低且距离目标极远,因此,目标对月球及其他行星反射太阳辐射的散射特性可忽略不计。

于是,在目标“可视表面”对(13)式和(14)式在可见光波段积分,得到在探测器入瞳处目标表面散射背景辐射产生的辐照度为

$$E_{\text{pupil}} = \int [E_{\text{pupil}}(\lambda) + E'_{\text{pupil}}(\lambda)] d\lambda. \quad (15)$$

综上所述,给定背景特性、材料特性、结构特性及轨道特性,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、探内,探测角每间隔 2° 采集一次, $\pm 10^\circ$ 范围外,探测角

测角和探测器入瞳面的偏角,分析目标表面之间的遮挡和掩蔽情况,结合所建立的目标光学散射特性的数学模型,即可获得目标在天基探测过程中动态的光学散射特性。

3 实验验证

以风云一号卫星缩比模型为例,进行目标光学散射特性数学模型的实验验证。首先,搭建目标光学散射特性测量平台,测量在探测器入瞳处目标表面散射背景辐射产生的辐照度;其次,利用目标光学散射特性的数学模型,计算相同参数条件下的目标辐照度;最后,将建模结果与测量结果进行比较,验证评估目标光学散射特性数学模型的效果。

3.1 实验测量

3.1.1 测量方案

目标光学散射特性测量平台由背景环境组件、动态光源组件、动态目标组件、输出探测组件和综合控制组件组成。背景环境组件为配备高消光比蜂窝内壁的积分球系统,具有温度和真空度调节功能,用于实现空间暗背景模拟;动态光源组件为配备二维运动框架的氙灯系统,具有强度和色温监测功能,用于实现光照属性及方向动态模拟;动态目标组件为配备三维运动框架的缩比模型,用于实现目标属性及姿态动态模拟;输出探测组件为配备变焦光学收集器的平行光管系统,用于实现携带目标光学散射特性的光束准直显示采集;综合控制组件用于实现背景环境、动态光源、动态目标、输出探测的协同操作。当动态光源组件发射的平行光以某一方向入射到目标表面后,输出探测组件在相应的方向接收目标表面散射的辐照度。测量方案如图6所示。目标缩比模型材料和大小等特征如表1所示。

表1 风云一号卫星缩比模型材料和大小

Table 1 Material and size of FengYun-1 satellite scale model

Region	Material	Size /mm
Body	Silver film	95×95×80
	Front Si	180×80
Sail	Back Black paint	180×80
	Length to body center	180

3.1.2 测量结果

基于风云一号卫星缩比模型,在光线入射角分别为 $30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ 时测量了目标表面散射的辐照度。在辐照度数据采集时,以镜像点为中心, $\pm 10^\circ$ 范围每间隔 5° 采集一次。基于辐射度数据在镜像点附

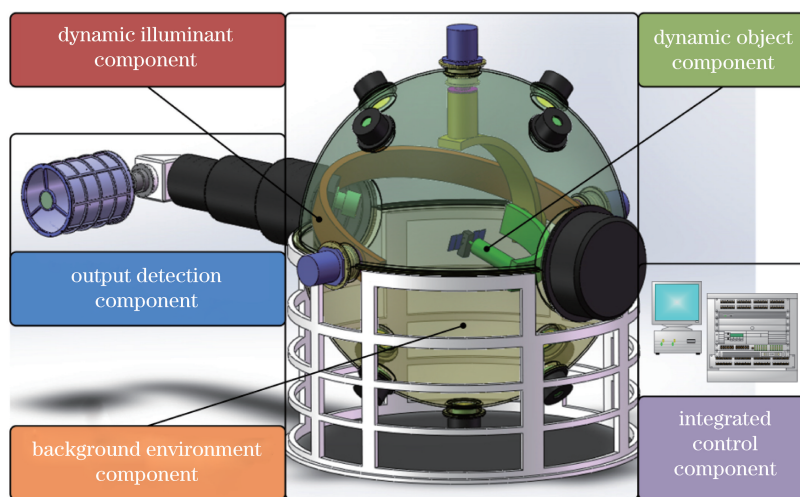


图 6 光学散射特性测量方案示意图

Fig. 6 Measurement scheme of optical scattering characteristics

近变化迅速,而在镜像点远处变化平缓的特点,在镜像点附近进行加密处理,这样既能保证测量精度,又

能加快实验速度。实验测量结果与建模计算结果如图 7 所示。

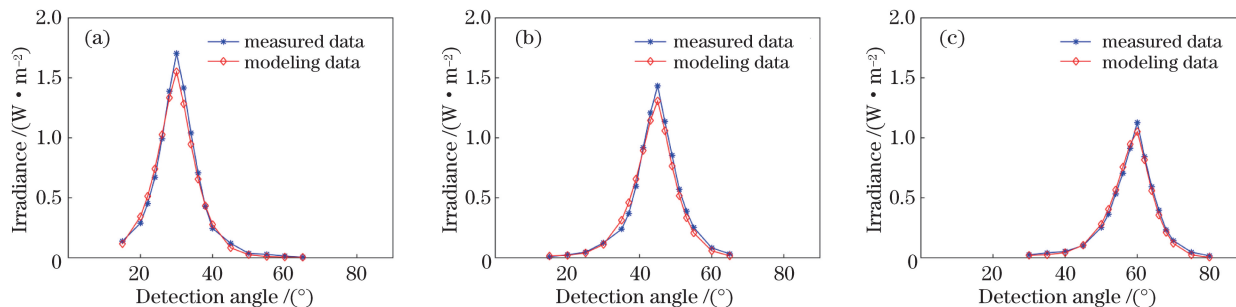


图 7 不同入射角下的建模结果与测量结果。(a) 30°; (b) 45°; (c) 60°

Fig. 7 Modeling and measured data at different incident angles. (a) 30°; (b) 45°; (c) 60°

从图 7 中可以看出,建模计算结果与实验测量结果具有相同的变化趋势,在镜像点位置达到峰值,然后向两侧迅速递减,最后趋于平缓。这是由于太阳帆板镜面反射特性较强,在峰值附近太阳帆板散射占主要部分,在两侧边缘目标本体散射占主要部分。此外,由于存在一定的背景杂散光,因此在峰值附近实验测量结果大于建模计算结果。

3.2 验证评估

建模是研究系统变化规律的重要手段和前提,建模的过程本质上是以各种可用的形式对系统中的真实对象和相互关系进行抽象描述的过程。但是,由于场景刻画不真实、测量统计不精确、仿真假设不合理,绝大多数模型并不能完全准确地描述原系统^[12],因此在建模与测量结束后必须进行模型验证与精度评估。采用相对均方误差的分析方法评估建模精度。光线入射角分别为 30°, 45°, 60°时,建模计算结果与实验测量结果之间的相对均方误差,即目标光学散射特性建模精度,如表 2 所示。

表 2 光学散射特性建模精度

Table 2 Modeling accuracy of optical scattering characteristics

Incident angle / (°)	Modeling accuracy / %
30	5.28
45	7.36
60	9.57

4 结 论

从工程应用的实际需求出发,针对目前天基空间目标光学散射特性建模精度低、面向应用研究还不完善的这一现状,基于目标的背景特性、材料特性、结构特性及轨道特性,采用理论建模、仿真分析、实验验证相结合的方式对目标光学散射特性进行了研究,主要结论和创新性工作总结如下:

1) 通过区域分解与网格划分对目标表面进行有限元分析,利用 BRDF 建立了目标光学散射特性的数学模型,与之前基于朗伯漫反射进行的目标光

学散射特性分析相比,提高了目标光学散射特性的建模精度。

2) 选取了适用于目标光学散射特性分析的 BRDF 五参量模型,该模型采用镜面反射、漫反射的组合来描述目标表面的散射特性,与典型的传统模型相比,物理意义更加清晰明确且具有速度快、精度高、适应性强等特点。

3) 引入矢量坐标描述光线入射方向和探测方向,便于判断目标表面之间的遮挡和掩蔽情况。基于轨道参数通过坐标变换确定背景辐射源、探测器相对于目标的几何位置关系,为分析目标某时刻、多角度的在轨特性及姿态变化影响提供了方便。

4) 对低温真空环境下的目标光学散射特性数学模型进行了实验验证,结果表明目标表面兼具镜面反射与漫反射特征,与之前基于简化平台条件开展的验证相比,能够更加精确地评估有限元分析、矢量坐标变换结合 BRDF 建模方法的精度。

由于某些特定数据短期内无法得到,研究工作还存在一些不足之处,有待于在下一步工作中改进和完善:

1) 虽然缩比模型与真实目标的几何结构和表面材料属性相同,但是表面材料褶皱并不完全相同,因而二者的光学特征存在一定差异,会受到缩比效应的影响。因此,在现有条件的基础上,开展真实目标光学散射特性的整星地面测量实验更具有实际意义。

2) 空间目标运行在 3.5 K 的空间环境中,背景光照条件十分复杂,继续开展目标光学散射特性的在轨测量研究,包括低温真空条件下的表面材料 BRDF 的测量以及整星在轨光学散射特性的测量,可为准确地检测和评估空间光电载荷的性能提供在轨测量数据。

参 考 文 献

- [1] Tang Z Y, Huang X F, Cai Z B. Development status and enlightenment of foreign space-based space surveillance systems[J]. *Aerospace Electronic Warfare*, 2015, 31(2): 24-26, 30.
汤泽滢, 黄贤锋, 蔡宗宝. 国外天基空间目标监视系统发展现状与启示[J]. *航天电子对抗*, 2015, 31(2): 24-26, 30.
- [2] Huang J M, Liu L J, Wang Y, *et al.* Imaging simulation of space target based on target's visible scatter characteristics[J]. *Aerospace Shanghai*, 2015, 32(5): 39-43, 72.

黄建明, 刘鲁江, 王盈, 等. 基于目标可见光散射特性的空间目标成像仿真研究[J]. *上海航天*, 2015, 32(5): 39-43, 72.

- [3] Bao W Z, Cong M Y, Zhang W, *et al.* A verification and validation method for calculation model of space target characteristics used for short-range optical navigation[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(8): 2249-2256.
鲍文卓, 丛明煜, 张伟, 等. 近程光学导航空间目标特性计算模型校验方法[J]. *光学学报*, 2010, 30(8): 2249-2256.
- [4] Wang H Y, Zhang W, Wang Z L. 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.
- [5] Nicodemus F E. Directional reflectance and emissivity of an opaque surface[J]. *Applied Optics*, 1965, 4(7): 767-775.
- [6] Shi W C, Zheng J M, Li Y, *et al.* Measurement and modeling of bidirectional reflectance distribution function on cutting surface[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(10): 1029001.
史卫朝, 郑建明, 李言, 等. 加工表面双向反射分布函数的测量与建模[J]. *光学学报*, 2018, 38(10): 1029001.
- [7] Butler S D, Nauyoks S E, Marciniak M A. Comparison of microfacet BRDF model to modified Beckmann-Kirchhoff BRDF model for rough and smooth surfaces[J]. *Optics Express*, 2015, 23(22): 29100-29112.
- [8] Yuan Y, Sun C M, Zhang X B. Measuring and modeling the spectral bidirectional reflection distribution function of space target's surface material[J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, 59(3): 2097-2103.
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*, 2010, 59(3): 2097-2103.
- [9] Marschner S R, Westin S H, Lafortune E P F, *et al.* Image-based bidirectional reflectance distribution function measurement[J]. *Applied Optics*, 2000, 39(16): 2592-2600.
- [10] Wang F G, Zhang W, Wang Z L. A calculation method for space target optical characteristics based on local region surface mesh-creation[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2012, 33(2): 81-87.
王付刚, 张伟, 王治乐. 基于区域网格化的空间目标光学特性计算方法[J]. *航天返回与遥感*, 2012, 33(2): 81-87.

- [11] Wang L, Zhang T, Cui W N, *et al.* The research of the simulation technique of the space object and background radiation characteristics[J]. Science Technology and Engineering, 2010, 10(15): 3610-3614.
王磊, 张涛, 崔文楠, 等. 空间目标和背景的辐照特性仿真技术研究[J]. 科学技术与工程, 2010, 10(15): 3610-3614.
- [12] Wei X Q, Huang J M, Yan G T, *et al.* A set of measurement and verification system for the dynamic visible scatter characteristics of space target[J]. Journal of Command and Control, 2015, 1(1): 81-85.
魏祥泉, 黄建明, 颜根廷, 等. 空间目标可见光散射动态特性测试校验系统[J]. 指挥与控制学报, 2015, 1(1): 81-85.