

基于 OpenGL 拾取技术的空间目标光学横截面积计算

徐 灿¹, 张雅声¹, 李 鹏², 李纪莲¹

¹装备学院航天装备系, 北京 101416;

²装备学院研究生管理大队, 北京 101416

摘要 空间目标光学横截面积(OCSA)的准确计算是空间目标特性分析及识别的重要基础和前提之一。针对面元网格法计算 OCSA 实时性差, 计算机图形学方法对材质的双向反射分布函数(BRDF)描述能力弱等问题, 提出了一种基于 OpenGL 拾取技术的复杂空间目标 OCSA 计算方法。通过 OpenGL 拾取技术实现面元的一次遮挡判断, 再基于改进 Z 缓冲技术实现面元的二次遮挡判断, 在实现计算实时性的基础上保留了面元的详细信息, 使高精度 BRDF 模型应用及 OCSA 精确计算得以开展。设计了嵌套式圆柱体和实际卫星模型并计算了其 OCSA 值, 其中嵌套圆柱体 OCSA 的计算误差小于 0.08%, 在普通计算机上运行的平均耗时小于 0.01 s, 对卫星 OCSA 的计算平均耗时小于 0.1 s, 验证了本文方法的正确性和实时性。

关键词 光计算; 空间目标特性; 光学横截面积; 拾取技术; Z 缓冲技术

中图分类号 O433.1 **文献标识码** A

doi: 10.3788/AOS201737.0720001

Calculation of Optical Cross Section Areas of Spatial Objects Based on OpenGL Picking Technique

Xu Can¹, Zhang Yasheng¹, Li Peng², Li Jilian¹

¹Department of Space Equipment, Equipment Academy, Beijing 101416, China;

²Department of Graduate Management, Equipment Academy, Beijing 101416, China

Abstract The accurate optical cross section areas (OCSA) calculation of spatial objects is an important foundation and prerequisite for the analysis and recognition of spatial object characteristics. Aiming at the problems of the poor real-time performance of the grid model used in the facing method and the weak ability for the description of bidirectional-reflectance-distribution-function (BRDF) of material by using the computer graphics method, an OCSA calculation method for complex space objects based on the OpenGL picking technique is proposed. The primary occlusion judgment of facets is realized by the OpenGL picking technique, and the second occlusion judgment between facets is realized based on the improved Z buffering technique. Therefore, the detailed information of facets is preserved without loss of real-time performance, which makes the application of precise BRDF model and the accurate calculation of OCSA possible. One nested cylinder and one satellite model are designed, and their OCSA value is calculated. The maximum OCSA error of the nested cylinder is less than 0.08% and the average time consumption on a general computer is less than 0.01 s. The average time consumption of OCSA for a satellite is less than 0.1 s. The results verify the correctness and real-time performance of the proposed method.

Key words optics in computing; spatial object characteristics; optical cross section areas; picking technique; Z buffering technique

OCIS codes 200.4506; 290.5820; 290.5890

1 引 言

随着航天活动的日益频繁, 空间目标的数量和种类不断增加, 卫星失效、解体、碰撞等突发情况难以避免, 加强空间目标监视成为开展空间活动的一种有效保障手段。其中, 空间目标光学散射特性计算及分析是空间目标监视的重要内容之一, 是目标探测和识别的基础与前提^[1]。卫星光学散射特性包括紫外^[2]、可见

收稿日期: 2017-03-03; **收到修改稿日期:** 2017-03-21

基金项目: 国家 863 计划(2015AA7046104)、国家自然科学基金(61304228)

作者简介: 徐 灿(1985—), 男, 博士, 讲师, 主要从事空间目标光电特性方面的研究。E-mail: 452394317@qq.com

光^[3]和红外等散射特性^[4],国内外通常采用光学横截面积(OCSA)^[5]这一参量来表征空间目标的光学散射特性。目前,计算 OCSA 的方法主要分为两种,即理论计算法和数值法。理论计算法仅能计算简单几何体的散射特性,其应用范围有限;数值法则是将三维模型拆分为诸多小的面元,计算面元散射特性后合成目标整体的散射特性,也称为面元网格法^[3]。数值法中,按照是否考虑光线在部件间的弹射,又分为单次散射法和弹射线法,鉴于空间光照条件单一,目标为单一物体,部件相互间影响较小等特点,对计算量巨大的弹射线法需求不大。本文主要针对基于面元网格法的 OCSA 数值计算方法开展研究。

基于面元网格法计算 OCSA 最直接的方法是逐个面元计算散射特性^[3],之后叠加形成目标散射特性。其中涉及到一次遮挡和二次遮挡的判断,由于需要对所有面元进行相互遮挡判断,目标面元数量较多时无法保障实时性。蓝朝桢等^[6]提出一种基于图形处理器(GPU)的目标散射特性计算方法,设置光源为标准白光,并设置各种材质的漫反射分量和镜面反射分量进行光照成像,通过分析图像亮度来获取反射率图。韩意等^[7]以 Phong 模型为基础,设置不同材质的反射属性,通过分析三色光在接收端的图像亮度,计算空间目标的 OCSA。杜小平等^[8-9]基于 Phong 模型计算卫星散射特性,并分析了卫星的运动状态。这类方法以目标在计算机上的成像亮度代替散射亮度,解决了空间目标散射特性计算中耗时的遮挡分析问题,但其无法应用更为准确的双向反射分布函数(BRDF)模型来描述散射情况,也无法描述菲涅耳现象及折射现象^[10],这极大限制了对复杂空间目标光学散射特性的描述。国外在空间目标光学散射特性模拟方面的研究较国内的更为系统、深入。美国国防部最早建立了卫星常用材质的光学特性数据库^[11],数据库内包括 Maxwell Beard 和 Phong 模型两类 BRDF 模型参数,美国空军的 TASAT 软件^[12]、波音公司的 SVST 软件^[13]以及 STK 软件的 EOIR 模块^[1],均利用该数据库开展卫星光学散射特性的模拟。加拿大皇家军事学院和国防研发中心则通过测量卫星模型的 BRDF 来分析卫星散射特性^[14],用以验证数值模拟结果。法国 Oktal Synthetic Environment 公司利用 SE-Workbench 软件进行光学散射特性分析^[15],可分析空天目标的散射特性。以上软件大多建立在 Phong 模型的基础上,其核心技术均为 Z 缓冲技术,同样存在材质描述能力弱、对复杂目标计算效率低的问题。针对这些问题,本文提出了一种基于 OpenGL 拾取技术的复杂空间目标散射特性计算方法,并结合改进 Z 缓冲技术,得到每个探测器可见面元的详细信息,可快速、准确计算复杂空间目标的 OCSA。

2 光学散射特性

2.1 OCSA 计算表达式

OCSA 能够全面反映目标几何结构、形状及其表面材料等多种因素对目标可见光散射特性的影响,与入射光的强度、光线传播及探测器距离等因素无关,更能反映目标自身的散射特性。

目标 OCSA 的定义为

$$S_{OC} = \int_A f_r(\theta_i, \theta_r, \varphi_i, \varphi_r) \cos \theta_i \cos \theta_r dA, \quad (1)$$

式中 $f_r(\theta_i, \theta_r, \varphi_i, \varphi_r)$ 为微小面元的双向反射分布函数,是反射光辐亮度和入射光辐照度的比值; 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; dA 为面元面积。各变量含义如图 1 所示,其中坐标原点到光源(太阳)的单位矢量 $\mathbf{S} = (x_s, y_s, z_s)$ 。

由(1)式可知,当已知入射及出射角度、面元面积、面元法向矢量和面元 BRDF 值时,可以准确计算 OCSA 数值。实际情况中制约计算速度和精度的关键因素是计算面元集合的确定,只有既被光照又对探测器可见的面元才能参与运算。目前基于 GPU 的 OCSA 计算方法中,应用像素成像亮度代替面元散射亮度,描述能力受到制约。本文方法的主要目的在于确定参与计算的面元集合(称之为有效面元集合),进而基于面元信息计算 OCSA 值。

2.2 OCSA 计算流程

获取有效面元集合的步骤主要是一次遮挡(自身遮挡)判断和二次遮挡(面元之间的遮挡)判断。通过 OpenGL 拾取技术解决一次遮挡问题,并基于改进的 Z 缓冲技术解决二次遮挡问题,进而实现对有效面元的提取。算法实现流程如图 2 所示,具体描述如下:

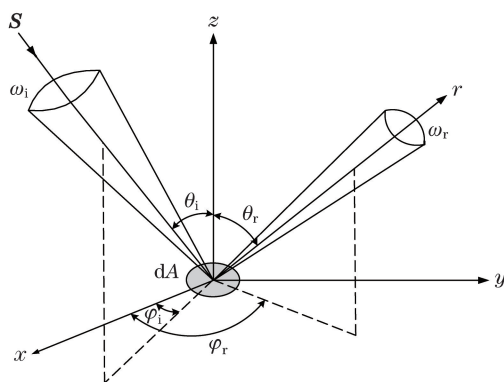


图 1 双向反射分布函数的几何关系

Fig. 1 Geometric relationship of BRDF

- 1) 利用三维建模软件对空间目标进行建模,将模型分割为若干三角面元并保留面元的材质信息,文件保存为 3ds 格式;
- 2) 解析模型文件,给每一个三角面元命名并记录其顶点、材质信息,基于 OpenGL 绘制目标模型;
- 3) 开启 OpenGL 深度缓存和深度测试,根据光源和探测器方位,分别设定模型观察方向,基于 OpenGL 拾取功能对光照面元和探测器可见面元进行初步提取,其中部分拾取的面元由于受到其他面元的遮挡是不可见的;
- 4) 利用改进 Z 缓冲技术,确定光照及探测器拾取面元中不受二次遮挡的有效面元,形成光照方向有效面元集合和探测方向有效面元集合;
- 5) 取上述两个有效面元集合的交集,交集集中的面元也称为有效面元,将参与 OCSA 计算;
- 6) 结合面元材质的 BRDF 值,计算每个面元的 OCSA 值,累加得到目标 OCSA 值。

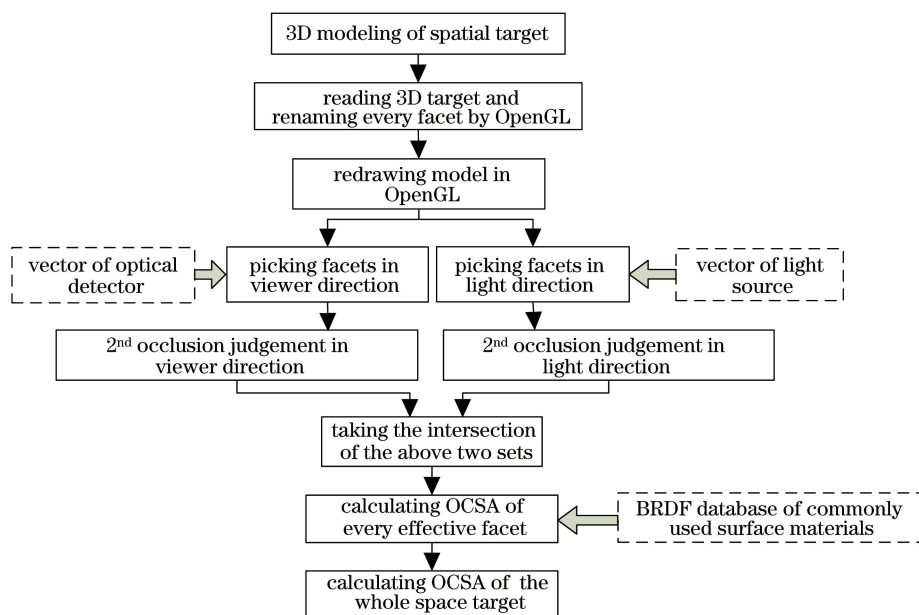


图 2 基于 OpenGL 拾取的空间目标 OCSA 快速计算方法流程

Fig. 2 Flow chart of OCSA fast calculation method of spatial targets based on OpenGL picking technique

计算过程需要引入的输入量包括太阳、探测器的位置矢量以及材质的 BRDF 数据库,着重对 BRDF 数据库进行说明。对于给定材质,其 BRDF 数值除与入射角、出射角有关外,还与波长有关。BRDF 数据库中存储着由大量测量数据解算得到的模型参数,测量所用光源的波长决定了这些参数适用的波长范围,国内外对空间目标常用材质的 BRDF 进行了详细研究^[11,16],本文方法也是在前期大量 BRDF 数据测量及 BRDF 参数反演的基础上提出的^[17]。

从 OCSA 的表达式可以看出,在 BRDF 值准确计算的基础上,OCSA 计算的准确性由有效面元获取的准确性决定。基于此,本文将研究的重点放在有效面元的快速、准确获取上,为计算 OCSA 提供方法依据。

3 OCSA 计算的实现

3.1 三维模型的准备与导入

正确应用拾取技术要求三维模型的每个面元都被命名,且面元均带有顶点、材质等详细信息。模型准备的目的是建立研究对象的三维模型,并将其面元化处理,建模过程要求材质名称、大小与实际模型的保持一致。具体实施方法分解如下。

1) 空间目标三维建模

利用三维建模软件对空间目标进行建模,将模型分割为若干三角面元并保留面元的材质信息,文件保存为 3ds 格式。

2) 解析 3ds 模型文件并利用 OpenGL 重绘三维模型

3ds 模型文件具有统一的结构,便于编程读取。该格式能稳定地保存模型网格信息和纹理贴图信息。3ds 模型文件由许多块组成,每个块描述其信息类别,即该块是如何组成的,块的信息类别用 ID 来识别,块中还包含了下一个块的相对位置信息^[7]。由于本文算法不再基于成像亮度来计算散射亮度,也就不需要纹理信息。在读取 3ds 文件时,仅需读取顶点数据、各对象材质名称及面元索引信息,将读入的面元按顺序存入链表中。

根据链表中存储的三角面元信息,利用 OpenGL 逐个绘制面元。需要注意的是,在绘制面元的同时需要给每个面元命名,利用 OpenGL 命令 `glLoadName(Name)`,括号中的 Name 为面元名称,名称为从 0 开始的整型数字,以便于后续进行拾取。

按照上述方法绘制的美国跟踪与数据中继卫星(TDRS)模型(面元数量 3642)如图 3 所示,由于不需要显示纹理,绘制的面元没有粘贴纹理图片,以免影响拾取速度。对于卫星表面出现的褶皱及微小部件,则主要通过卫星建模来实现,而后在面元化处理过程中加以体现。

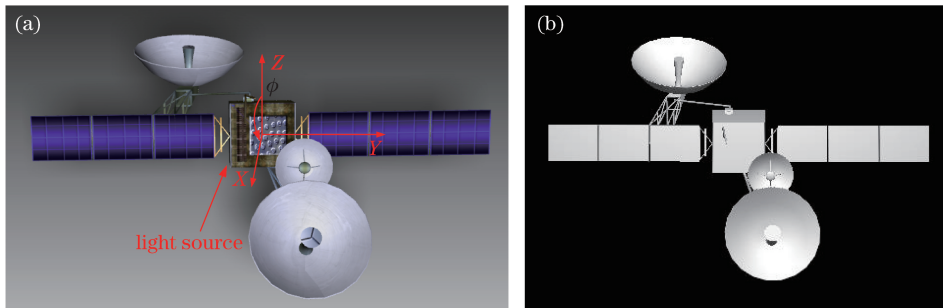


图 3 (a) TDRS 模型; (b) 重绘结果

Fig. 3 (a) Model of TDRS; (b) redrawn result

3.2 面元拾取操作

进行拾取前首先要将模型旋转至观察视角,以确保拾取正确的部件。

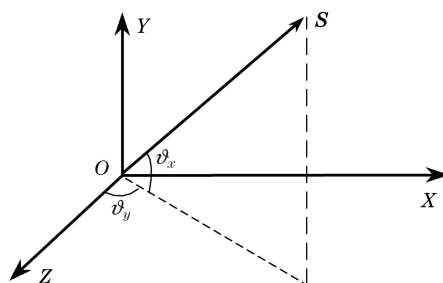
光照视角的旋转,也就是将光线照射到的图像投影到用户视角(用户视角沿 Z 轴正向望向原点)下。OpenGL 绘制模型时,模型坐标系中心在绘制窗口的中心位置,X 轴从原点向右为正,Y 轴则从原点向上为正,Z 轴与 XOY 平面呈右手系,如图 4 所示。

在 OpenGL 坐标系下,将光照视角旋转为用户视角的旋转角度为

$$\vartheta_x = \arccos y_s, \vartheta_y = -\arccos(z_s / \sqrt{x_s^2 + z_s^2}). \quad (2)$$

在解算以上两个角度的基础上,两次调用 OpenGL 旋转函数,完成绕 X 轴的旋转和绕 Y 轴的旋转,旋转函数分别为 `glRotatef(ϑ_x , 1.0, 0.0, 0.0)`和 `glRotatef(ϑ_y , 0.0, 1.0, 0.0)`。

按照上述方法将太阳视角旋转至用户视角下,然后利用 OpenGL 拾取功能对可见面元进行拾取。拾取前应设定拾取范围,拾取范围为整个绘图窗口(前提是目标模型必须在窗口中全部显示),拾取结果存储到相

图4 OpenGL坐标系及矢量 S 的旋转角示意图Fig. 4 Schematic diagram of coordinate system and rotation angles of vector S in OpenGL

应数组中,记其面元集合为 A_1 。

同样,将探测器观测视角旋转至用户视角下,对探测器可见面元进行拾取并记其面元集合为 A_2 。

取 $A_1 = A_1 \cap A_2$, 则集合 A_1 中的面元为探测器可见的光照面元。当然,其中部分面元受到其他面元的遮挡是不可见的,二次遮挡分析就是要剔除这部分面元。

3.3 二次遮挡分析

在有效面元确定过程中,拾取技术仅剔除了受自身遮挡的面元。设面元法向矢量为 V_1 , 面元到观察点的单位矢量为 N_1 , 拾取面元满足 $V_1 \cdot N_1 > 0$ 。而对于复杂空间目标,还存在面元之间的相互遮挡,即二次遮挡。对于二次遮挡,可以利用 OpenGL 的 Z 缓冲技术来解决。直接应用 Z 缓冲技术获取的是像素深度值,由于需要获取具体面元的顶点、材质等详细信息,需要对方法进行改进。在进行二次遮挡查询前,需要首先了解深度的含义。OpenGL 中,深度是指该像素点在三维世界中距离摄像机的距离(摄像机位于屏幕外无限远处),距离摄像机越远,深度值越大。由于研究的对象是面元,需要建立面元与像素间的对应关系。现有 OCSA 计算方法中,均基于像素的亮度值开展散射特性分析^[3,7],对面元的详细信息分析不足。

一次遮挡判断时进行了双重拾取,因此需要对每一个拾取集合进行二次遮挡分析。首先获取当前视角下图形的像素深度值列表(可使用 `glReadPixels` 命令来获取所有像素的深度值),这是直接应用 Z 缓冲技术的结果。但该命令针对的对象是像素,不涉及面元,必须建立两者之间的联系。

具体方法如下。对于集合 A_1 , 其面元分别为 $\{a_{11}, a_{12}, \dots, a_{1n}, \dots, a_{1N}\}$, 取其中第 n 个面元 a_{1n} 。设面元三个顶点的中心矢量(三角面元的几何中心)为 c_{1n} , 将该点投影到窗口上,投影后获取该点的深度值 D_c 。投影后获取对应的像素坐标,查询该坐标处的图像深度值(即该坐标处显示像素的深度值) D_p 。如果 $D_c \leq D_p$, 则说明该面元是不被遮挡的面元。依次遍历集合 A_1 中的所有面元,得到不被其他面元遮挡的面元集合 A_{11} 。该方法的原理如图 5 所示。

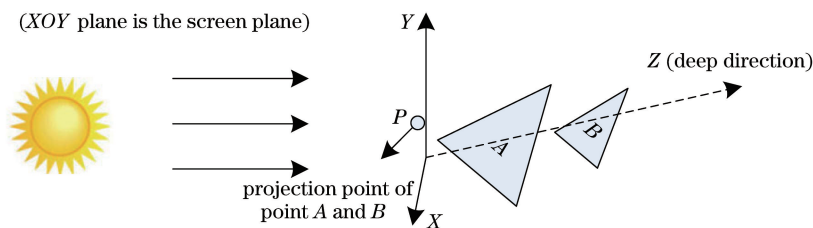


图5 二次遮挡判断的原理图

Fig. 5 Schematic diagram of the second occlusion judgment

图 5 中面元 A、B 为同一目标上的两个面元,且面元 A 可以显示在窗口中,面元 B 受到面元 A 的遮挡。两个面元投影到屏幕上的坐标相同,即位于同一像素点 P。通过 Z 缓冲技术可以获取 P 像素的深度值;同时,面元 A、B 的中心点都会投影到 P 点,但面元 B 的中心点深度值大于 P 点深度值,因此判定其为受遮挡面元。

按照同样的方法得到探测器可见面元的集合,记为 A_{22} 。

取以上两集合的交集,即 $M = A_{11} \cap A_{22}$ 。集合 M 中所有面元均带有顶点、法线矢量、材质等详细信息,可以利用精确的 BRDF 模型计算 OCSA 值,打破了图像学传统方法的局限。

3.4 目标 OCSA 计算

基于有限元思想的目标 OCSA 计算中,积分变为累加,设某次运算中集合 M 中有 N 个面元,则目标 OCSA 的计算公式变为

$$S_{oc} = \sum_{l=1}^N f_{rl}(\theta_i, \theta_r, \varphi_i, \varphi_r) \cos \theta_i \cos \theta_r A_l, \quad (3)$$

式中 A_l 为第 l 个面元的面积, f_{rl} 为该面元的 BRDF 值。

4 算法验证与分析

4.1 数值模拟与解析解对比

复杂目标 OCSA 值的真实值难以获取,也就无法使用复杂目标对算法进行验证。鉴于简单几何体的 OCSA 存在解析解,以高为 5 m、半径为 1 m、反射率为 0.5 的朗伯圆柱体[图 6(a)为面元化处理后的圆柱体,面元数量为 396]为例,验证本文算法的正确性,其体坐标系如图 6(b)所示。同时,为验证遮挡判断效果并分析结果的正确性,在圆柱体内部嵌套一个半径为 0.8 m、高度为 5 m 的圆柱体,如果遮挡分析正确,这一部分圆柱应对结果没有贡献。分别取两组不同的测试角度,对比理论值与数值仿真结果。

\mathbf{O}_s 为光源矢量; \mathbf{O}_D 为探测器矢量; \mathbf{O}_s 与 Y 轴夹角为 η ; \mathbf{O}_s 在 XOZ 平面上的投影与 Z 轴重合; \mathbf{O}_D 与 Y 轴的夹角为 γ ,其在 XOZ 平面上的投影与 Z 轴夹角为 β 。若朗伯圆柱体的半球反射率为 $\rho_{2\pi}$,则其 BRDF 为 $\rho_{2\pi}/\pi$ 。得出朗伯圆柱体的 OCSA 表达式为

$$S_{oc_col} = \begin{cases} \frac{\rho_{2\pi}RL \sin \eta \sin \gamma [\sin \beta + (\pi - \beta) \cos \beta]}{2\pi} + \rho_{2\pi}R^2 \cos \eta \cos \gamma, & \cos \eta \cos \gamma \geq 0 \\ \frac{\rho_{2\pi}RL \sin \eta \sin \gamma [\sin \beta + (\pi - \beta) \cos \beta]}{2\pi}, & \cos \eta \cos \gamma < 0 \end{cases}, \quad (4)$$

式中 R 为底面半径, L 为圆柱体高度。由于内部圆柱对 OCSA 理论计算不产生影响,这里 $R=1, L=5, \rho_{2\pi}=0.5$ 。

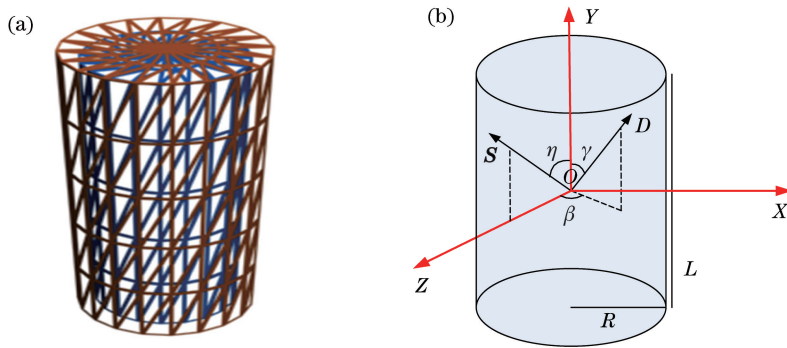


图 6 (a) 面元化处理后的圆柱体; (b) 圆柱体几何示意图

Fig. 6 (a) Cylinder after facet treatment; (b) geometric diagram of cylinder

实验 1: 令 $\eta = \gamma = 0$, β 取 $[0^\circ, 180^\circ]$, 分析 OCSA 及其误差, 如图 7(a)、(b) 所示。实验 2: 令 $\beta = 0$, $\eta = 45^\circ$, γ 取 $[0^\circ, 180^\circ]$, 分析 OCSA 及其误差, 如图 7(c)、(d) 所示。

通过以上分析可知,本文算法计算值与理论值吻合度较高,误差均小于 0.08%,表明该算法遮挡判断是有效的,且具有较高的计算精度。算法在内存 4 G,主频 3.3 GHz 的 32 位 Win7 操作系统下运行,完成全部 180 次 OCSA 运算,所需时间约为 2 s,平均单次运算时间只有 0.01 s,充分体现了该方法快速准确的特点。

本文方法以面元为计算单元,不再局限于计算机图形学中常用的 Phong 模型。由于获取了面元的详细信息,各类精确的 BRDF 模型得到应用,如描述能力更强的五参数模型^[10,16]等。以计算 TDRS 的 OCSA 值为例,分析实际材质与朗伯体材质的差异。论文前期利用法国 Light Tec 公司生产的型号为 REFLET 180S 的 BRDF 测量系统测量了三种卫星常用材质的 BRDF 数值^[17],并对其五参数模型进行了反演(波长

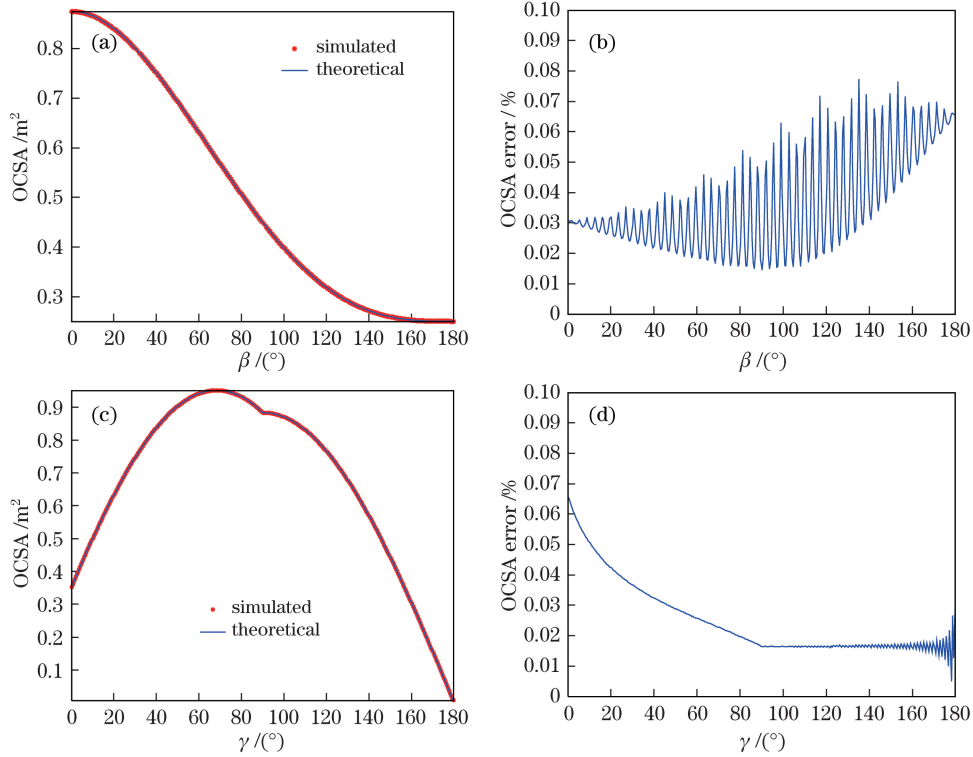


图 7 OCSA 模拟值与理论值对比。(a) OCSA 计算结果(实验 1);(b) OCSA 计算误差(实验 1);
(c) OCSA 计算结果(实验 2);(d) OCSA 计算误差(实验 2)

Fig. 7 Comparison of simulated and theoretical OCSA value. (a) Calculation result of OCSA (test 1);
(b) calculation error of OCSA (test 1); (c) calculation result of OCSA (test 2);
(d) calculation error of OCSA (test 2)

范围为400~1000 nm),得出其五参数模型参数,见表 1,其中 k_b 为镜面反射分量大小, k_r 为面元法线分布函数, k_d 为漫反射分量大小, a 、 b 为影响反射强度空间分布的系数^[16]。

表 1 卫星上常用三种材质的五参数模型参数值

Table 1 BRDF parameters of five-parameters model of three commonly used surface materials on satellite

Satellite surface material	k_b	k_r	b	a	k_d
Gold polyimide coating material	353.488	1.610	-383.719	0.588	0.038
Single-junction GaAs solar cell	29.831	16.714	-570.023	0.616	0.035
White paint	6.590	0.581	-12.710	0.216	0.117

表 1 中包覆材料属于强镜面反射材料,包裹于卫星本体上;单结 GaAs 电池片也属于镜面反射材料,反射强度比包覆材料的稍弱,是卫星电池板的常用材料;白漆则是一种漫反材料,在各类天线上应用较多。

分析坐标系如图 3(a)所示,通过 OpenGL 将目标投影到计算机屏幕上,坐标系原点为目标中心, Y 轴指向屏幕右侧, Z 轴指向屏幕上方, X 轴满足右手系。仿真中,光源一直从 +X 轴照向 -X 轴,探测器位于 XOZ 平面内,与 Z 轴夹角为 ϕ (从 +Z 轴向 +X 轴旋转时 ϕ 为正)。令 ϕ 取 $[0^\circ, 180^\circ]$, 分别假设卫星为反射率 0.5 的朗伯体和实际材质,计算其 OCSA 值,结果如图 8 所示。本文方法完成 180 次 OCSA 运算需要 14 s,平均单次运算时间小于 0.1 s,完全满足对复杂空间目标 OCSA 进行实时高精度运算的要求。

从图 8 可以看出,在朗伯体假设下,卫星 OCSA 变化较为平缓。而在实际材质假设下,卫星在镜面反射方向出现了较强的角闪烁效应,其他方向的散射特性则由于天线散射的贡献与朗伯材料的接近,这一点与卫星表面镜面反射材料的散射特性一致。由于采用了五参数 BRDF 模型,对卫星材质的散射特性描述能力更强,也更有利于描述卫星整体的散射特性。

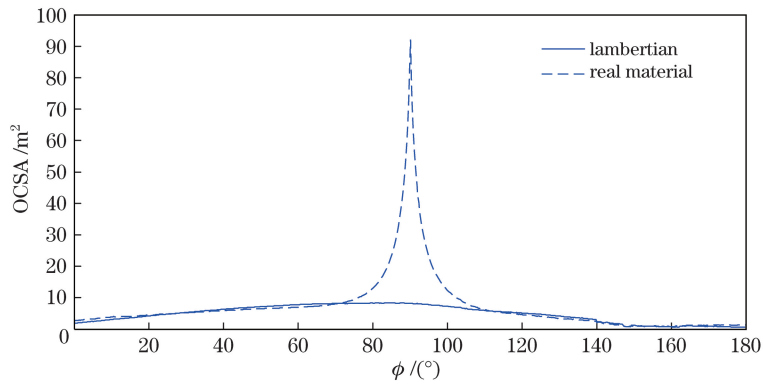


图 8 TDRS 的 OCSA 计算结果

Fig. 8 Calculation results of TDRS OCSA

4.2 数值模拟与缩比模型测量对比

为进一步验证所提算法,基于现有条件搭建了风云 3 号卫星的简易缩比模型并设计了相应的三维模型,如图 9 所示。其中卫星本体在测量方向存在褶皱,为模拟此类现象,在三维模型中增加了表征褶皱的突起,几何尺寸与实物一致。

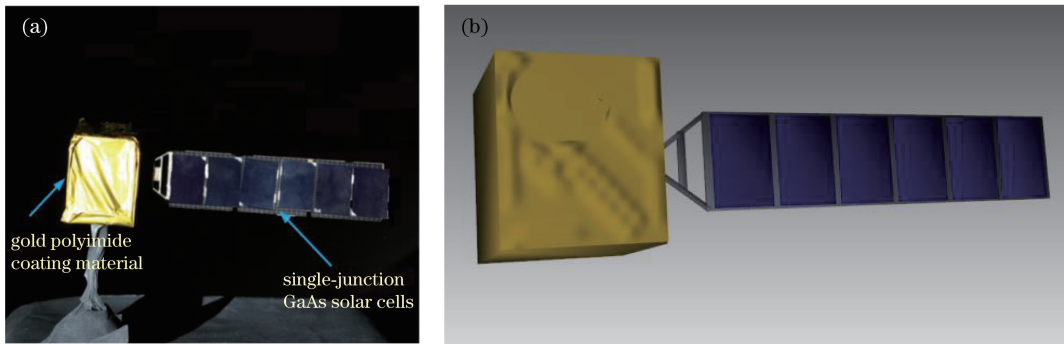


图 9 (a) 风云 3 号卫星简易模型; (b) 风云 3 号 3D 数字模型

Fig. 9 (a) Simple model of Fengyun-3 satellite; (b) 3D digital model of Fengyun-3 satellite

卫星本体包覆金色聚酯薄膜,卫星帆板采用单结砷化镓电池板。其中,卫星本体为边长 8 cm 的立方体,砷化镓电池板长 22 cm,宽 5 cm,光源为氙灯光源(60 W),探测器为美国 ASD 公司生产的 FieldSpec 4 光谱仪,观测镜头为 10° 镜头,光源距离目标 5 m,光谱仪距离目标 4 m。利用激光经纬仪在暗室内标定 10° 间隔的观测角度。实验中,放置卫星使其帆板法线方向偏离入射光 20°,因此测量的理论镜面反射方向在 20° 位置。暗室内统一粘贴反射率低于 1% 的黑色吸光布,观测场景及观测几何示意图如图 10 所示。

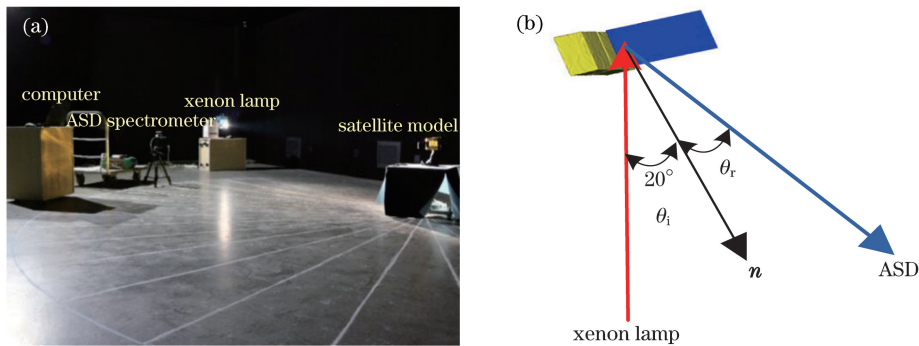


图 10 (a) 测量场景; (b) 测量几何示意图

Fig. 10 (a) Measurement scene; (b) geometric diagram of measurement

图 10 中 n 为电池板的法线矢量, θ_i 为入射角(目标中心、光源之间连线与 n 的夹角), θ_r 为反射角(目标中心、探测器之间连线与 n 的夹角)。首先在各标记点处测量得到标定白板(聚四氟乙烯, 26 cm × 26 cm)亮

度值 I_{white} (在 400~1000 nm 范围内积分),而后测量卫星模型的亮度值 I_{sat} 。由于标定白板的面积及反射率已知,则可以准确计算得到其 OCSA,设为 $S_{\text{OC_white}}$ 。根据 OCSA 的定义,在入射光亮度及观测几何一致的条件下,OCSA 值与观测亮度成正比,由此可计算卫星模型的 OCSA 值为

$$S_{\text{OC_sat}} = S_{\text{OC_white}} \frac{I_{\text{sat}}}{I_{\text{white}}} \quad (5)$$

由于镜面反射附近区域(20° 附近)亮度上升快且幅值较高,因此在 10° 间隔的基础上,补充采集数据。对 3D 模型进行相同观测角度下的 OCSA 模拟,观测结果与测量结果的对比如图 11 所示。

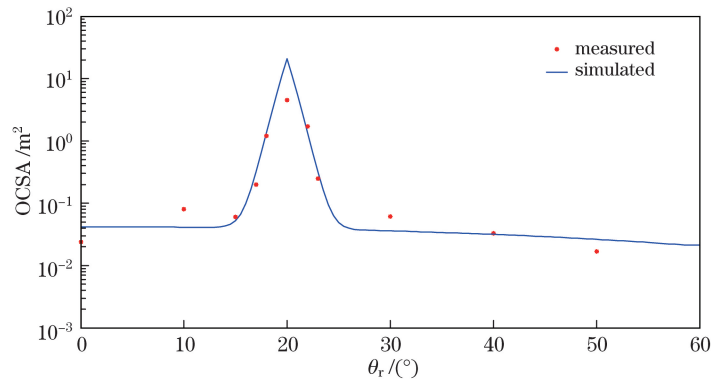


图 11 OCSA 数值计算及测量结果对比

Fig. 11 Comparison of measured and simulated OCSA results

由图 11 结果可以看出,OCSA 最大值出现在镜面反射方向(即反射角 20° 位置),但由于褶皱表面的存在,具有较强散射值的角度范围扩大。对测量结果进行统计,在不考虑 20° 镜面反射方向测量结果时,其他点测量结果的平均误差为 8.65%,这一结果说明测量结果与模拟结果具有较好的一致性,验证了本文算法的准确性。引入 20° 方向的测量结果,则平均测量误差为 22.55%,误差大幅上升。这是由于金色薄膜为强镜面反射材料,在镜面反射方向的反射较为剧烈,而偏离镜面反射方向后,辐射亮度会迅速降低。在实验测量过程中,模型指向误差、探测器定位误差和 3D 模型制作误差等原因导致探测器难以准确接收到镜面反射方向的光能量,出现较大误差。应该说,这一误差的产生是由测量几何误差经镜面反射材料 BRDF 特性放大引起的,与面元拾取结果关系不大。后续可以考虑采用 3D 打印技术来生成卫星模型,或采用高精度转台等手段减小测量误差。

5 结 论

实时高精度计算空间目标的 OCSA 值,在空间目标探测方案设计、目标探测、目标识别等方面具有重要作用。本文方法充分利用 OpenGL 功能,突破了现有 OCSA 计算方法在实时性、精度方面的制约,为复杂空间目标光学散射特性的模拟提供了依据。需要指出的是,拾取的有效面元信息不仅可用于计算空间目标的可见光散射特性,也可用于计算红外、激光及光学区雷达散射特性。

参 考 文 献

- [1] Han Yi, Sun Huayan. Advances in space target optical scattering character research[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(3): 758-766.
韩 意, 孙华燕. 空间目标光学散射特性研究进展[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(3): 758-766.
- [2] Yuan Yan, Sun Chengming, Huang Fengzhen, *et al.* Modeling of ultraviolet characteristics of deep space target[J]. Acta Physica Sinica, 2011, 60(8): 089501.
袁 艳, 孙成明, 黄锋振, 等. 深空背景下空间目标紫外特性建模方法研究[J]. 物理学报, 2011, 60(8): 089501.
- [3] Bao Wenzhuo, Cong Mingyu, Zhang Wei, *et al.* An optical characteristics calculating method based on surface mesh-creation for space targets[J]. Journal of 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.

- [4] Sun Chengming, Yuan Yan, Zhang Xiubao. Modeling of infrared characteristics of deep space target[J]. Acta Physica Sinica, 2010, 59(10): 7523-7530.
孙成明, 袁 艳, 张修宝. 深空背景下空间目标红外特性建模方法研究[J]. 物理学报, 2010, 59(10): 7523-7530.
- [5] Ackermann M, McGraw J, Martion J, *et al.* Blind search for micro satellites in LEO: Optical signatures and search strategies[C]. AMOS Technical Conference, 2003: 1-24.
- [6] Lan Chaozhen. Modeling and detecting capability analysis of space-based space object optical observation system[D]. Zhengzhou: PLA Information Engineering University, 2009: 49-72.
蓝朝楨. 空间目标天基光学观测系统建模与探测能力分析[D]. 郑州: 解放军信息工程大学, 2009: 49-72.
- [7] Han Y, Sun H Y, Li Y C. Fast calculation method of complex space targets' optical cross section[J]. Applied Optics, 2013, 10(6): 4013-4019.
- [8] Liu Hao, Du Xiaoping, Gou Ruixin. Apparent magnitude measurement of geosynchronous orbit space object based on Phong model[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2016, 53(4): 041502.
刘 浩, 杜小平, 苟瑞新. 基于 Phong 模型的地球同步轨道目标视星等仿真研究[J]. 激光与光电子学进展, 2016, 53(4): 041502.
- [9] Du Xiaoping, Liu Hao, Chen Hang, *et al.* Research of satellite shape inversion matching algorithm based on photometric characteristic[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(8): 0820001.
杜小平, 刘 浩, 陈 杭, 等. 基于光度特性的卫星形状反演匹配算法研究[J]. 光学学报, 2016, 36(8): 0820001.
- [10] Torrance K E, Sparrow E M. Theory for off-specular reflection from roughened surfaces[J]. Journal of the Optical Society of America, 1967, 57(9): 1105-1112.
- [11] Kennedy P K, Keppler K S, Thomas R J, *et al.* Validation and verification of the Laser Range Safety Tool (LRST)[C]. SPIE, 2003, 4953: 143-153.
- [12] Bush K, Crockett G A, Barnard C. Satellite discrimination from active and passive polarization signatures: Simulation predictions using the TASAT satellite model[C]. SPIE, 2002, 4481: 46-57.
- [13] Crockett G A, Brunson R L. Visualization tool for advanced laser system development[C]. SPIE, 2002, 4724: 69-77.
- [14] Bédard M D, Lévesque M, Wallace B. Measurement of the photometric and spectral BRDF of small Canadian satellites in a controlled environment[C]. AMOS Technical Conference, 2011: 1-10.
- [15] Douchina N, Jolya A, Meynard T, *et al.* Simulation of active EO imaging system based on SE-Workbench and OSMoS software tools[C]. 5th International IR Target and Background Modeling & Simulation Workshop, 2009.
- [16] Wu Zhensen, Xie Donghui, Xie Pinhua, *et al.* Modeling reflectance function from rough surface and algorithms[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(8): 897-901.
吴振森, 谢东辉, 谢品华, 等. 粗糙表面激光散射统计建模的遗传算法[J]. 光学学报, 2002, 22(8): 897-901.
- [17] Li P, Li Z, Xu C. Measuring and modeling the bidirectional reflection distribution function of space object's surface material[C]. 3rd International Conference on Materials Engineering, Manufacturing Technology and Control, 2016, 2: 1676-1681.