

# 基于 Phong 模型的地球同步轨道目标视星等仿真研究

刘浩<sup>1</sup> 杜小平<sup>2</sup> 苟瑞新<sup>1</sup>

<sup>1</sup>装备学院研究生管理大队, 北京 101416

<sup>2</sup>装备学院航天指挥系, 北京 101416

**摘要** 地球同步轨道上运行着大量的空间目标, 基于光度曲线反演空间目标信息为目标的跟踪、识别与监视提供了新的技术途径。利用 STK 软件, 通过坐标变换获取不同轨道参数下太阳、卫星以及观测站的时空关系。根据视星等定义, 利用面元法基于 Phong 模型推导出适用于立方体、棱柱体以及圆柱体空间目标的视星等模型。通过与实测数据对比, 验证该视星等模型的仿真误差约为 3%, 仿真效果远好于仅采用漫反射率表征的视星等模型。基于 Matlab 软件, 仿真研究了不同弧段、不同形状以及不同尺寸卫星光度曲线的变化规律。研究表明, 当获取的光度曲线质量较高时采用非线性滤波技术反演, 仅能获得特殊点的视星等信息时采用二面法理论反演, 为下一步光度曲线反演提供了一定参考。

**关键词** 机器视觉; 光测数据处理; 视星等; 形状模型; 卫星平台; 光度曲线

中图分类号 V19; V556.5

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP53.041502

## Apparent Magnitude Measurement of Geosynchronous Orbit Space Object Based on Phong Model

Liu Hao<sup>1</sup> Du Xiaoping<sup>2</sup> Gou Ruixin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Graduate Management, Academy of Equipment, Beijing 101416, China

<sup>2</sup>Department of Space Command, Academy of Equipment, Beijing 101416, China

**Abstract** There are a lot of spatial objects running along the geosynchronous orbit (GEO). Estimation of the shape and attitude of space objects by using light curves provides a method for object tracking, identification and surveillance. The temporal and spatial relationship among the sun, satellite and observation station under different orbit parameters is obtained via coordinate transformation by using the STK software. According to the definition of apparent magnitude, the calculation model suitable for cube, prism and cylinder objects is derived with the facet method based on the Phong model. Through comparison with the measured data, it is demonstrated that the simulation error of the model is about 3%, the simulation result is far better than the result obtained by the apparent magnitude model only characterized by the diffuse reflectance. Based on the Matlab software, the light curves of satellites with different segments, shapes and sizes are simulated. The study shows that the nonlinear filtering technique is adopted for inversion if obtained light curves have better quality, otherwise the two-facet analytical model is used. The research offers a reference for the inversion based on light curves.

**Key words** machine vision; photometric data processing; apparent magnitude; shape model; satellite platforms; light curve

**OCIS codes** 150.1135; 280.4788; 350.6090; 200.4560

## 1 引言

地球同步轨道上运行着大量通信卫星、导航卫星、导弹预警卫星以及侦察卫星等战略卫星, 卫星平台形状主要是圆柱体、棱柱体以及立方体。为了维护并正常利用地球同步轨道资源, 对地球同步轨道卫星的观

收稿日期: 2015-09-16; 收到修改稿日期: 2015-10-26; 网络出版日期: 2016-03-08

基金项目: 部委资助项目

作者简介: 刘浩(1990—), 男, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事空间目标监视与识别方面的研究。

E-mail: haoliu991109@sina.cn

导师简介: 杜小平(1966—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事空间目标探测方面的研究。

E-mail: dellladuxiaoping@163.com

测、跟踪与识别受到了越来越多的重视。

卫星视星等是对卫星反射太阳照射光产生的光辐照度的度量。卫星光度曲线是基于时间序列以及相位角序列的卫星视星等变化曲线,通过分析卫星光度曲线可以反演出卫星的本体和帆板的大小、形状、材料以及姿态等信息。基于光度曲线反演地球同步轨道卫星信息,从数学的角度看属于逆问题,是反演的过程。目前国内外学者主要通过经验公式法<sup>[1-2]</sup>和面元法<sup>[3-4]</sup>计算空间目标视星等。经验公式法将卫星形状等效为光照截面面积,所需参数少,计算简单,具有很强的时效性,但是结果粗略。面元法通过部件拼接,将卫星视为典型形状的组合,所需参数多,比经验公式法精确,但是目前研究人员仅将卫星表面材料视为漫反射朗伯面,采用漫反射率来表征,没有应用双向反射分布函数(BRDF)模型,和实际情况相差较大,不够精确。为了达到光度曲线反演的要求,本文尝试利用面元法基于BRDF模型精确计算卫星视星等。目前常用于分析材料光学散射特性的正向模型有Maxwell Beard、Davies及Torrance-Sparrow等模型,参数较多的正向模型不利于逆问题的求解,因此选择所需参数较少且准确度相对较高的Phong模型。

本文运用视星等的定义,推导出基于Phong模型的地球同步轨道上不同平台形状卫星的视星等模型。通过与兴隆观测站的实测数据对比,验证了模型的精确性。利用视星等模型仿真地球同步轨道上不同弧段、不同形状以及不同尺寸卫星的光度曲线,为下一步基于光度曲线反演卫星形状、尺寸以及姿态等提供了参考。

## 2 形状模型

卫星由有限平面元组成,平面元定义三个基本的坐标向量 $[\mathbf{u}_n^B, \mathbf{u}_u^B, \mathbf{u}_v^B]$ ,如图1所示。 $\mathbf{u}_n^B$ 为面元的法向量,垂直于面元向外, $\mathbf{u}_u^B$ 和 $\mathbf{u}_v^B$ 在面元平面内且相互垂直,三者符合笛卡儿坐标系右手定律<sup>[5]</sup>。卫星为刚体,三者不会随时间变化。 $\mathbf{B}$ 表示向量位于本体坐标系, $\mathbf{I}$ 表示向量位于地球惯性坐标系。 $\mathbf{u}_{\text{sun}}^I$ 为面元指向太阳的单位向量, $\mathbf{u}_{\text{obs}}^I$ 为面元指向观测站的单位向量, $\mathbf{u}_h^I$ 为 $\mathbf{u}_{\text{sun}}^I$ 和 $\mathbf{u}_{\text{obs}}^I$ 的二分线向量,即 $\mathbf{u}_h^I = \frac{1}{2}(\mathbf{u}_{\text{sun}}^I + \mathbf{u}_{\text{obs}}^I)$ 。

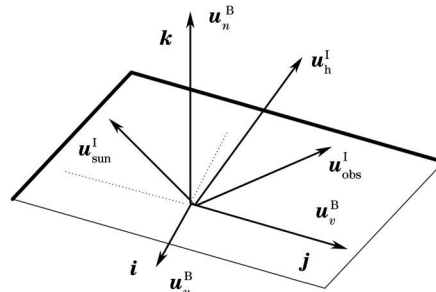


图1 形状反射模型

Fig.1 Shape reflection geometry

## 3 坐标变换

已知6个轨道根数和观测站经纬度,可通过STK软件获得空间目标、观测站以及太阳每个时刻在地球惯性坐标系(J2000)的坐标。在空间目标面元分析中,需要将STK获得的地心惯性坐标系坐标转换至卫星本体坐标系,最后转换至卫星面元坐标系。研究对象的简化模型如图2所示,坐标系 $x_0y_0z_0$ 为卫星本体坐标系,

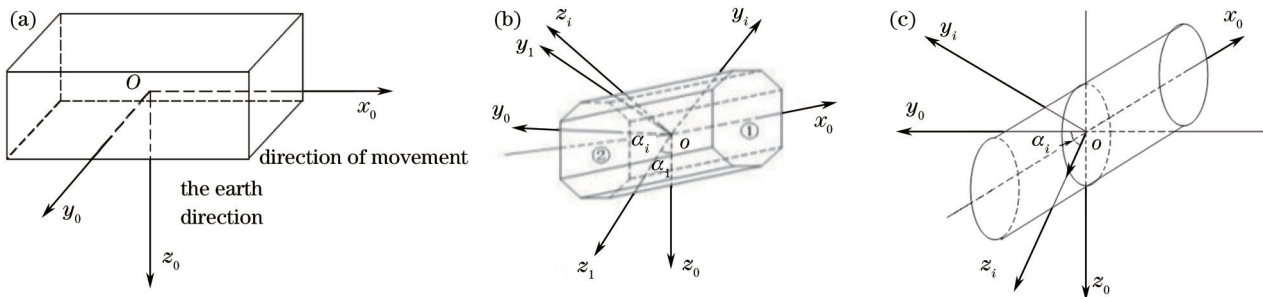


图2 研究对象简化模型。(a) 立方体;(b) 棱柱体;(c) 圆柱体

Fig.2 Simplified models of research objects. (a) Cuboid; (b) prismoid; (c) cylinder

$x_i, y_i, z_i$  为卫星面元坐标系。

### 3.1 地球惯性坐标系至卫星本体坐标系的转换

通过 STK 软件仿真获得  $t$  时刻太阳坐标  $\mathbf{u}_{\text{sun}}^I$ 、观测站坐标  $\mathbf{u}_{\text{obs}}^I$ 、卫星坐标  $\mathbf{u}_{\text{pt}}^I$  以及卫星的欧拉角  $(\xi, \eta, \zeta)$ ，首先通过转换矩阵

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \zeta & \sin \zeta \\ 0 & -\sin \zeta & \cos \zeta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \eta & 0 & -\sin \eta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \eta & 0 & \cos \eta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \cos \xi & \sin \xi & 0 \\ -\sin \xi & \cos \xi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

进行转换。通过平移得到观测站与太阳在卫星本体坐标系中的坐标为

$$\mathbf{u}_{\text{sun}}^B = \mathbf{A} \cdot \mathbf{u}_{\text{sun}}^I - \mathbf{A} \cdot \mathbf{u}_{\text{pt}}^I, \quad (2)$$

$$\mathbf{u}_{\text{obs}}^B = \mathbf{A} \cdot \mathbf{u}_{\text{obs}}^I - \mathbf{A} \cdot \mathbf{u}_{\text{pt}}^I, \quad (3)$$

得到相位角

$$\theta = \arccos \left( \frac{\mathbf{u}_{\text{sun}}^B \cdot \mathbf{u}_{\text{obs}}^B}{\|\mathbf{u}_{\text{sun}}^B\| \|\mathbf{u}_{\text{obs}}^B\|} \right). \quad (4)$$

### 3.2 卫星本体坐标系至卫星面元坐标系的转换

#### 3.2.1 侧面坐标系的转换

无论形状是立方体、棱柱体还是圆柱体，卫星平台都可以看作由侧面和两个端面组成，设与  $z_0$  轴垂直的长方形面元为基准侧面，与基准侧面邻近的第  $i$  个侧面如图 2 所示<sup>[6]</sup>，需在基准侧面的基础上，将基准法线  $z_0$  轴绕  $x_0$  轴旋转  $-\alpha_i$  至第  $i$  个侧面的法线  $z_i$  轴处，其变换矩阵为

$$\mathbf{A}_i = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha_i & -\sin \alpha_i \\ 0 & \sin \alpha_i & \cos \alpha_i \end{pmatrix}, \quad (5)$$

式中  $\alpha_i = \frac{2\pi}{n}i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ 。转换后的太阳坐标为  $\mathbf{u}_{\text{sun}}^{B_i} = \mathbf{A}_i \cdot \mathbf{u}_{\text{sun}}^B$ ，观测站坐标为  $\mathbf{u}_{\text{obs}}^{B_i} = \mathbf{A}_i \cdot \mathbf{u}_{\text{obs}}^B$ 。

#### 3.2.2 端面坐标系的转换

对于卫星平台的两个端面，转换矩阵分别为

$$\mathbf{A}_a = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{A}_b = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

得到太阳坐标  $\mathbf{u}_{\text{sun}}^{B_a}$  和  $\mathbf{u}_{\text{sun}}^{B_b}$ ，观测站坐标  $\mathbf{u}_{\text{obs}}^{B_a}$  和  $\mathbf{u}_{\text{obs}}^{B_b}$ 。

通过上述运算得到每个卫星面元坐标系中太阳和观测站的坐标，便于利用面元法基于 Phong 模型计算卫星视星等。

## 4 基于 Phong 模型的视星等模型的建立

犹他州立大学 Bui Tuong Phong 于 1975 年提出了第一个适用于计算机图形学的 Phong 模型，这个各向异性的 BRDF 模型可以用于仿真计算空间目标的视星等<sup>[7]</sup>。BRDF 建立了面元入射辐照度和出射辐亮度之间的联系，主要以光源入射角和反射角为参数，确定各个方向的 BRDF 值。该 BRDF 主要由镜面反射分量和漫反射分量组成<sup>[8]</sup>：

$$\rho_{\text{total}}(i) = \rho_{\text{spec}}(i) + \rho_{\text{diff}}(i). \quad (7)$$

对于漫反射部分，将目标视为朗伯面，在各个方向上辐射亮度相同；对于镜面反射部分，反射能量主要集中在发生镜面反射的面元。将卫星视为有限个面元的集合，卫星星等值通过各个面元的计算量累加得到<sup>[9]</sup>。对每个面元进行分析，镜面反射分量为

$$\rho_{\text{spec}}(i) = \frac{D}{8\pi} \frac{[\mathbf{u}_n^{B_i} \cdot \mathbf{u}_n^{B_i}(i)]^2}{\mathbf{u}_n^{B_i} \cdot \mathbf{u}_{\text{sun}}^{B_i}(i) + \mathbf{u}_n^{B_i} \cdot \mathbf{u}_{\text{obs}}^{B_i}(i) - [\mathbf{u}_n^{B_i} \cdot \mathbf{u}_{\text{sun}}^{B_i}(i)][\mathbf{u}_n^{B_i} \cdot \mathbf{u}_{\text{obs}}^{B_i}(i)]} F_{\text{reflect}}(i), \quad (8)$$

$$z = \frac{n_u(i) [\mathbf{u}_h^{B_i}(i) \cdot \mathbf{u}_u^{B_i}]^2 + n_v(i) [\mathbf{u}_h^{B_i}(i) \cdot \mathbf{u}_v^{B_i}]^2}{1 - [\mathbf{u}_h^{B_i}(i) \cdot \mathbf{u}_n^{B_i}]^2}, \quad (9)$$

式中  $D$  为材料镜面反射分布特性。

菲涅耳反射为

$$F_{\text{reflect}}(i) = R_{\text{spec}} + (1 - R_{\text{spec}}) \left[ 1 - \mathbf{u}_{\text{sun}}^{B_i}(i) \cdot \mathbf{u}_h^{B_i}(i) \right]^5, \quad (10)$$

漫反射分量为

$$\rho_{\text{diff}}(i) = \left( \frac{28R_{\text{diff}}}{23\pi} \right) (1 - R_{\text{spec}}) \left\{ 1 - \left[ 1 - \frac{\mathbf{u}_n^{B_i} \cdot \mathbf{u}_{\text{sun}}^{B_i}(i)}{2} \right]^3 \right\} \left\{ 1 - \left[ 1 - \frac{\mathbf{u}_n^{B_i} \cdot \mathbf{u}_{\text{obs}}^{B_i}(i)}{2} \right]^3 \right\}, \quad (11)$$

式中  $R_{\text{spec}}$  为材料镜面反射系数,  $R_{\text{diff}}$  为材料漫反射系数。

太阳可见光波段辐射至卫星的辐射照度为

$$E_{\text{sun}}(i) = E_{\text{sun,vis}} \rho_{\text{total}}(i) \left[ \mathbf{u}_n^{B_i} \cdot \mathbf{u}_{\text{sun}}^{B_i}(i) \right], \quad (12)$$

式中  $E_{\text{sun,vis}} = 671 \text{ W/m}^2$ , 当太阳矢量方向与面元法向量夹角大于  $\frac{\pi}{2}$  时,  $E_{\text{sun}}(i) = 0$ 。

太阳光线经过卫星反射至观测站的辐射照度为

$$E_{\text{obs}}(i) = \frac{E_{\text{sun}}(i) A(i) \left[ \mathbf{u}_n^{B_i} \cdot \mathbf{u}_{\text{obs}}^{B_i}(i) \right]}{\|d^B\|^2}, \quad (13)$$

式中  $A(i)$  为面元的面积, 不同的平台形状选择不同的面元,  $d^B$  为观测站至卫星的距离, 当观测站矢量方向与面元法向量夹角大于  $\frac{\pi}{2}$  时,  $E_{\text{obs}}(i) = 0$ 。

得到卫星的视星等模型为

$$m = -26.7 - 2.5 \lg \left| \frac{\sum_{i=1}^{N_F} E_{\text{obs}}(i)}{E_{\text{sun,vis}}} \right|. \quad (14)$$

## 5 视星等模型的实验验证

选取某三轴稳定通信卫星为研究对象, 利用 REFLET180 测量仪 (STILSA, 法国) 对目标表面材料进行测量, 再拟合 Phong 模型参数, 如表 1 所示。平台尺寸为  $1.75 \text{ m} \times 2.1 \text{ m} \times 2.3 \text{ m}$ , 2 块太阳帆板尺寸为  $6.5 \text{ m} \times 1.68 \text{ m}$ 。

表 1 Phong 模型参数

Table 1 Parameters of Phong model

	$D$	$R_{\text{spec}}$	$R_{\text{diff}}$
Body	271.5	0.045	0.0042
Solar panel	116.5	0.202	0.0014

选取河北兴隆为观测站, 北纬  $40^\circ 23' 36''$ , 东经  $117^\circ 34' 30''$ , 海拔高度为  $960 \text{ m}$ 。设置轨道参数, 半长轴为  $42164 \text{ km}$ , 轨道倾角为  $0.8513^\circ$ , 偏心率为  $0.0001864^\circ$ , 近地点幅角为  $0^\circ$ , 升交点为赤经  $0^\circ$ , 真近点角为  $302.3^\circ$ 。仿真时间为北京时间 2015 年 7 月 8 日 22:00—2015 年 7 月 9 日 01:00。通过 STK 获得时空关系后, 利用 Matlab 软件仿真获得了卫星基于时间序列的光度曲线。于 2015 年 7 月 6 日至 9 日赴国家天文台兴隆观测站, 利用口径为  $1 \text{ m}$  的德国  $50 \text{ cm}$  望远镜实地观测该通信卫星, 通过图像改正、仪器星等测量 (测光) 和星等标定等得到了剔除大气效应后的光度曲线, 利用实测的光度曲线与仿真的光度曲线进行对比分析, 如图 3 所示。

利用

$$\sigma_{\text{correctness}} = \left| \frac{m_{\text{Phong}} - m_{\text{xinglong}}}{m_{\text{xinglong}}} \right|, \quad (15)$$

$$\sigma_{\text{accuracy}} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (m_i - \mu)^2}, \quad (16)$$

分别得到视星等模型的仿真准确度误差为 2.5%，精确度误差为 3%。文献[4]采用漫反射率表征材料光学散射特性建立的视星等模型的误差为 10%。实验结果表明，采用 Phong 模型表征材料光学散射特性建立的视星等模型仿真效果好。

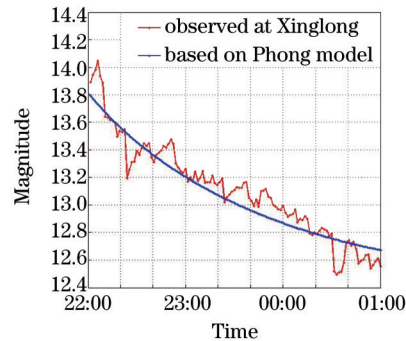


图3 光度曲线对比

Fig.3 Comparison of light curves

## 6 仿真研究与分析

基于已经验证的视星等模型，选定国家天文台兴隆观测站，仿真时段为北京时间 2015 年 7 月 8 日 22:00—2015 年 7 月 9 日 06:00，仿真获取立方体和圆柱体卫星的光度曲线。用不同弧段、不同形状以及不同尺寸卫星光度曲线的变化规律指导反演。

### 6.1 仿真结果

情况 1): 图 4 所示为不同形状、相同体积卫星的光度曲线。相同体积下，立方体卫星的星等值最小；圆柱体卫星的星等值比立方体卫星星等值大约 1 个星等；同等体积下，圆柱体卫星侧面积越大，星等值越小，侧面积增加 0.1，星等值减小约 0.1。

情况 2): 图 5 所示为不同尺寸、相同形状、不同底面积卫星的光度曲线。无论是立方体还是圆柱体卫星，体积越大星等值越小。

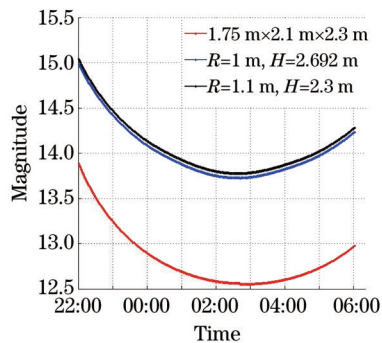


图4 不同形状卫星的光度曲线

Fig.4 Light curves of satellites with different shapes

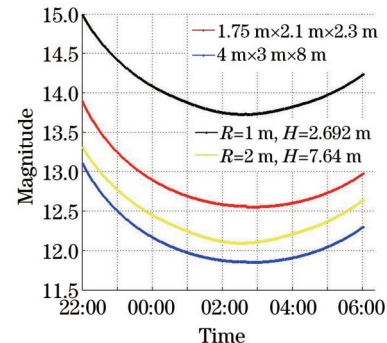


图5 不同尺寸、不同底面积卫星的光度曲线

Fig.5 Light curves of satellites with different sizes and different bottom areas

情况 3): 图 6 所示为不同尺寸、相同形状、相同底面积卫星的光度曲线。对于立方体卫星，底面积是星等值的主要决定因素，对于圆柱体卫星，侧面积是星等值的主要决定因素。

鉴于情况 2) 和情况 3) 的仿真结果，针对立方体卫星仿真了卫星平台和太阳帆板的漫反射和镜面反射情况，如图 7 所示。

从图 7 可以看出，卫星平台主要以漫反射为主，太阳帆板主要以镜面反射为主，经过分析，特别是在小相位角区域(相位角小于 20°)，太阳帆板具有明显的镜面反射特性，此结论和文献[1-2]以及观测数据一致。



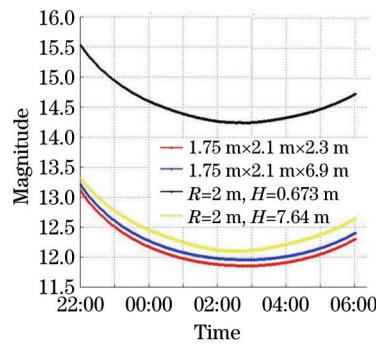


图6 不同尺寸、相同底面积卫星的光度曲线

Fig.6 Light curves of satellites with different sizes and same bottom area

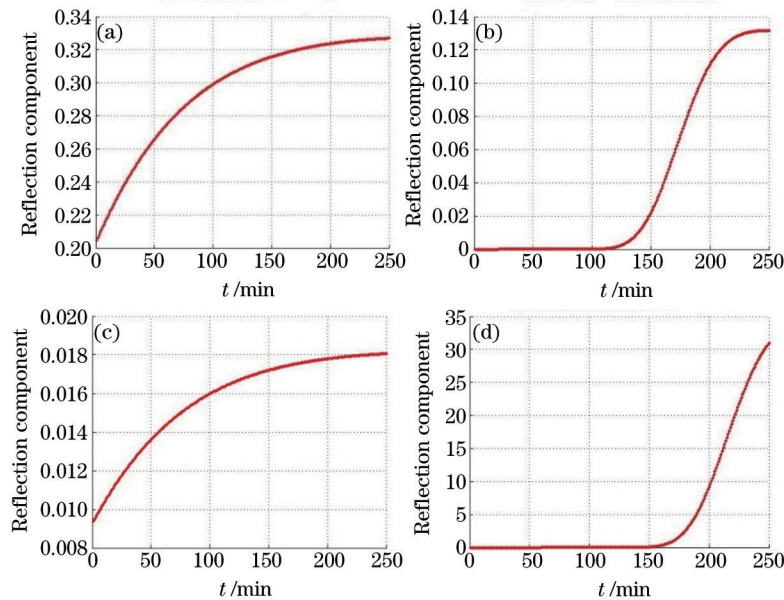


图7 卫星漫反射和镜面反射分量。(a) 本体漫反射分量;(b) 本体镜面反射分量;(c) 帆板漫反射分量;(d) 帆板镜面反射分量

Fig.7 Charts of satellite diffuse and specular reflection components. (a) Body diffuse reflection component;

(b) body specular reflection component; (c) solar panel diffuse reflection component;

(d) solar panel specular reflection component

## 6.2 仿真结论

通过对上述不同形状、不同尺寸卫星光度曲线的仿真分析,可以得到以下结论。

1) 虽然卫星各个面之间存在过渡,但是光度曲线能够连续变化,因此当获得的卫星光度曲线连续性较强时,可以基于非线性滤波技术,采用数学求逆的思想反演卫星信息。非线性滤波方法的优点是可以反演卫星的三维形状,缺点是所需光度曲线质量较高,反演的实时性比较差。

2) 根据仿真情况 1),如果地面观测站具备中高轨道 0.1 星等的识别能力,可以推算当地球同步轨道卫星表面积相差 1/10 时,能够成功进行反演。

3) 根据仿真情况 1),相同体积下,立方体卫星的视星等较小,圆柱体卫星的视星等较大,约相差 1 个星等,当体积相差不大时,可以区分立方体卫星与圆柱体卫星。

4) 根据仿真情况 2)和 3),可以将三维卫星视为二维卫星本体平面和帆板平面的组合,如图 8 所示。基于 Phong 模型,将卫星本体视为朗伯面,发生漫反射,太阳帆板视为镜面,发生镜面反射,即二面法理论。二面法理论的优点是可以解决高质量光度曲线较难获取的问题,仅需要几个特殊相位点的信息即可反演卫星形状,实时性好,缺点是仅能得到卫星的二维形状,因此在任务实时性要求较高时,该方法可以作为非线性滤波技术的有效补充。

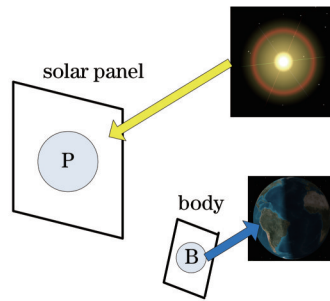


图8 二面法理论模型

Fig.8 Two-facet analytical model

## 7 结 论

既非基于漫反射进行粗略仿真,也非基于详细BRDF数据进行精确仿真,而是兼顾速度快捷和精度较高两方面,利用面元法基于Phong模型建立了适用于立方体、棱柱体以及圆柱体的视星等模型。通过与实测数据对比,验证该视星等模型视星等仿真误差约为3%,仿真效果远好于仅采用漫反射率表征的视星等模型。利用STK和Matlab软件仿真了不同弧段、不同形状以及不同尺寸卫星的光度曲线。通过研究分析得到当获取的光度曲线质量较高时采用非线性滤波技术反演,当仅能获得特殊点的视星等信息时采用二面法理论反演的重要指导性结论。二面法的仿真计算方法,具有一定的先进性。由于没有充分考虑空间环境对卫星表面材料的影响,导致Phong模型参数不够精确。下一步工作的重点,一是充分考虑空间环境对卫星表面材料的影响,二是进一步量化分析不同形状、不同尺寸以及不同轨道参数对光度曲线的影响。可为基于光度曲线对空间目标的识别分类提供一定的借鉴,为基于光度曲线反演空间目标信息提供支撑。

## 参 考 文 献

- 1 Tang Yijun, Jiang Xiaojun, Wang Jianfeng, *et al.*. Diffuse reflection optical characteristics of three-axis stabilization GEO satellite[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(11): 2863-2866.  
唐轶峻, 姜晓军, 王建峰, 等. 三轴稳定 GEO 卫星漫反射光变特性[J]. *光子学报*, 2009, 38(11): 2863-2866.
- 2 Tang Yijun, Jiang Xiaojun, Lu Xiaomeng, *et al.*. Analysis of photometric characteristics of medium and high apogee satellites based on light-reflection model[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(3): 763-767.  
唐轶峻, 姜晓军, 卢晓猛, 等. 利用光照反射模型分析中高轨人造卫星测光特性[J]. *光学学报*, 2010, 30(3): 763-767.
- 3 Tan Bin, Yao Dongsheng, Xiang Chunsheng, *et al.*. Star magnitude computing model of space targets like prism[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2008, 35(7): 33-37.  
谈 斌, 姚东升, 向春生, 等. 类柱体空间目标的星等计算模型研究[J]. *光电工程*, 2008, 35(7): 33-37.
- 4 Hu Miao, Xu Guorui, Zhang Hui, *et al.*. Star magnitude measurement of geosynchronous orbit cube target[J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2013, 40(6): 6-10.  
胡 淼, 徐国蕊, 张 慧, 等. 地球同步轨道立方体目标的视星等测算[J]. *光电工程*, 2013, 40(6): 6-10.
- 5 Linares R, Crassidis J, Jah M. Astrometric and photometric data fusion for resident space object orbit, attitude, and shape determination via multiple-model adaptive estimation[C]. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference*, 2010: 23-31.
- 6 Zhao Yangsheng. Analysis and modeling of space target optical characteristics[D]. Beijing: Academy of Equipment, 2010.  
赵阳生. 空间目标光学特性分析与模型建立[D]. 北京: 装备学院, 2010.
- 7 Wang Zhenbao, Feng Guobin, Yang Pengling, *et al.*. Numerical simulation and applications of a method for attenuating laser power density[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(2): 022201.  
王振宝, 冯国斌, 杨鹏翎, 等. 一种激光功率密度衰减方法的数值模拟及应用[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(2): 022201.
- 8 Linares R. Probabilistic identification and discrimination of deep space objects via astrometric and photometric data fusion [D]. Buffalo: State University of New York, 2013.
- 9 Yuan Jianying, Zhao Chun, Liu Qiliang, *et al.*. Fresnel reflection-based optical fiber sensor for quasi-distributed refractive index measurement[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(9): 092801.  
袁剑英, 赵 春, 柳齐亮, 等. 基于菲涅耳反射的准分布折射率传感器研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(9): 092801.

栏目编辑: 史 敏