

# 三轴稳定地球同步轨道卫星帆板季节性 闪光现象研究

徐灿<sup>1</sup>, 张雅声<sup>1</sup>, 张峰<sup>2</sup>, 刘程浩<sup>2</sup>

<sup>1</sup>航天工程大学宇航科学与技术系, 北京 101416;

<sup>2</sup>航天工程大学研究生院, 北京 101416

**摘要** 季节性闪光现象是由三轴稳定地球同步轨道(GEO)卫星保持的特殊对地位置及卫星帆板的运动特点产生的。结合卫星帆板材质的双向反射分布函数及太阳在地球坐标系下的运动规律,分析了帆板季节性闪光现象的原理,定量研究了地面站观测帆板闪光现象的相关规律并进行了仿真实验验证。研究表明,地面任意地点的望远镜每年都有两个时段能够观测到 GEO 卫星帆板闪光现象,每次持续约 21 d,每颗卫星每天的观测时间约 32 min。该结论不仅能够观测 GEO 卫星提供参考,也可为分析卫星工作及运动状态提供依据。

**关键词** 散射; 空间光学; 季节性闪光; 三轴稳定; 地球同步轨道卫星

中图分类号 O433.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201838.0529001

## Seasonal Glint Phenomenon of the Solar Arrays of Three-Axis Stabilization GEO Satellite

Xu Can<sup>1</sup>, Zhang Yasheng<sup>1</sup>, Zhang Feng<sup>2</sup>, Liu Chenghao<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Astronautical Science and Technology, Space Engineering University, Beijing 101416, China;

<sup>2</sup>Graduate School, Space Engineering University, Beijing 101416, China

**Abstract** The special seasonal glint phenomenon of solar arrays is caused by the special position kept by the three-axis stabilization geosynchronous earth orbit (GEO) satellite and the motion law of the solar arrays. Quantitative analysis about the theory of the phenomenon is made based on the bidirectional reflectance distribution function of the solar arrays materials and the sun movement in Earth centered coordinate. The characteristics of glint phenomenon are summed up and the conclusions are validated by simulation tests. The results indicate that, for any telescope on the ground, there are two durations one year to detect the glint phenomenon of solar arrays, in which each duration lasts about 21 days, and the detect time one day is about 32 minutes for each GEO satellites. The conclusions could not only provide references to detect GEO satellites, but also could be the basis to analyze the working state and motion state of GEO satellites.

**Key words** scattering; space optics; seasonal glint; three-axis stabilization; GEO satellite

**OCIS codes** 350.6090; 290.5280; 200.4740

## 1 引 言

地球同步轨道(GEO)卫星由于具有相对地球近似静止的特点,一般用于通信、气象、数据传输等,属于高价值卫星。因为距离过远,光学成像观测 GEO 卫星的难度较大,所以对 GEO 卫星的非成像光度观测是掌握其目标状态、开展目标识别的重要手段。国内对 GEO 卫星光度的实测和数值计算均

有研究,其中唐轶峻、姜晓军等<sup>[1-2]</sup>利用天文测光方法研究了 GEO 卫星的反射光变特性,认为散射主要包括本体的漫反射和太阳帆板的镜面反射两部分,大相位角下以漫反射为主,小相位角下会出现镜面反射的现象。文献[3-4]基于 Phong 模型开展 GEO 卫星的星等仿真计算,利用二面法理论对卫星外形进行了分析。而国外则基于各种大口径望远镜开展 GEO 目标的观测<sup>[5-10]</sup>,并利用光度数据开展目

收稿日期: 2017-11-09; 收到修改稿日期: 2017-12-14

基金项目: 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

标状态、外形等信息的反演,但对卫星的镜面反射特性没有进行详细分析。文献[11-12]在实测数据中观测到了 GEO 卫星的帆板闪光现象,并利用该现象分析了卫星帆板的运动角速度,但没有深入分析闪光的规律。

总结国内外关于 GEO 卫星光学特性的研究现状可知,帆板镜面反射引起的闪光现象已经得到证实,但并未对该现象进行定量分析,也没有得出可以指导实际观测的相关结论,仿真计算中大多是将卫星模型进行简化,没有考虑帆板追踪太阳的运动。

本文基于卫星帆板双向反射分布函数及卫星运动特性,研究 GEO 卫星帆板追踪太阳时引起闪光现象的特点和规律,对地面站观测闪光现象的日期、时间等问题进行量化分析,总结出可指导实践观测的关键结论。

## 2 太阳的运动特点分析

GEO 卫星可以被近似认为相对地面观测站保持静止,因此,影响卫星光学散射特性的主要因素是太阳的位置和帆板的运动。为便于总结规律,需要在不失准确性的条件下定量研究太阳运动。地球围绕太阳运动的过程中,太阳、月球和其他行星的摄动力导致岁差,使黄道和春分点缓慢运动,同时地球非球形摄动引起章动,使地球自转轴缓慢进动。鉴于以上两种移动的变化量极小,本文假设地球围绕太阳作无摄运动,选择轨道根数描述太阳运动。太阳相对地球和黄道在 2000 年前后几十年的椭圆轨道根数如下<sup>[13]</sup>:轨道半长轴  $a = 1.4960 \times 10^8$  km,轨道偏心率  $e = 0.016709$ ,轨道倾角  $i = 0.00^\circ$ ,升交点赤经  $\Omega$  与近地点幅角  $\omega$  之和  $\Omega + \omega = 282.94^\circ$ ,平近点角  $M = 357.5356 + 35999.049 \times T$ ,式中,  $T = (D_{JD} - 2451545.0)/36525.0$  为 2000 年 1 月 1.5 日(J2000) 历元开始的儒略世纪数,  $D_{JD}$  为儒略日,  $T$  的单位为 ( $^\circ$ )。对于太阳运动而言,由于偏心率和轨道倾角都很小,可采用简单且不失精度的级数展开来提高计算速度,太阳的黄经  $\lambda_s$  和距离  $r_s$  (单位 km) 可表示为

$$\begin{cases} \lambda_s = \Omega + \omega + M + 6892'' \sin M + 72'' \sin(2M), \\ r_s = [149.619 - 2.499 \cos M - 0.021 \cos(2M)] \times 10^6. \end{cases} \quad (1)$$

太阳的黄纬  $\beta_s$  可近似为零。基于太阳的黄经和黄纬可以计算太阳在黄道坐标系的坐标,考虑黄道与赤道的关系,可以直接得到其在地球惯性坐标系下的坐标:

$$\mathbf{R}_{se} = \mathbf{R}_x(-\epsilon) \begin{bmatrix} r_s \cos \lambda_s \cos \beta_s \\ r_s \sin \lambda_s \cos \beta_s \\ r_s \sin \beta_s \end{bmatrix} = \mathbf{R}_x(-\epsilon) \begin{bmatrix} r_s \cos \lambda_s \\ r_s \sin \lambda_s \\ 0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

式中:  $\mathbf{R}_x(-\epsilon)$  为绕 X 轴旋转  $-\epsilon$  角度的旋转矩阵,  $\epsilon$  为黄赤交角,  $\epsilon = 23.4393^\circ$ 。

根据单位旋转矩阵的定义,将(2)式化简为

$$\mathbf{R}_{se} = \begin{bmatrix} r_s \cos \lambda_s \\ r_s \sin \lambda_s \cos \epsilon \\ r_s \sin \lambda_s \sin \epsilon \end{bmatrix}. \quad (3)$$

从(3)式可以看出,太阳在地惯系中的赤经为  $\sin \lambda_s \sin \epsilon$ ,考虑到  $\sin \epsilon$  为常数,因此赤经的最大值出现在  $\lambda_s = 90^\circ$  的位置,即夏至时,最小值出现在  $\lambda_s = 270^\circ$  的位置,即冬至时。

GEO 卫星可被近似为定点在地球赤道上方 36000 km 处的某个经度上(纬度近似为  $0^\circ$ ),因此,研究地面测站、太阳、卫星三者间的相对关系,还需要将太阳的位置转换到地固系。由地心惯性坐标系(J2000)到地心固连坐标系(WGS84)的转换矩阵为

$$\mathbf{R}_{sf} = \mathbf{R}_z(T_G) \mathbf{R}_{se}, \quad (4)$$

式中:  $T_G$  为平春分点与格林尼治子午线之间的夹角。至此,已经获得了太阳在地心赤道系下的位置随时间的变化关系,由于  $T_G$  每 24 h 运动  $360^\circ$ ,具有短周期性,首先研究太阳在 J2000 坐标系下的运动特点,而后分析地球自转对探测的影响。

从 2017 年 12 月 20 日 0 时 0 分(UTC 时间,冬至时)开始,到 2018 年 12 月 20 日 0 时 0 分结束,图 1 为太阳纬度的变化曲线,其横坐标单位为 d,设起始时间为第 0 d。

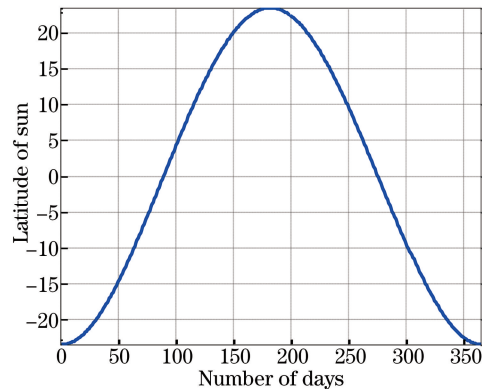


图 1 一年内太阳纬度的变化趋势

Fig. 1 Latitude of sun during one year

由于地球自转,太阳每 24 h 在地球的纬度带上运动一周。GEO 卫星以地球自转角速度运转以保持定点关系,因此,太阳纬度决定了 GEO 卫星散射

亮度的长周期变化特点,而太阳经度决定了 GEO 卫星散射的短周期变化特点。本文将主要研究长周期特性,即太阳纬度引起的散射特性变化特点。

### 3 GEO 卫星光散射特性

#### 3.1 卫星表面常用材质的光学散射特性

材质的光学散射特性可用双向反射分布函数(BRDF)来描述,其中最为经典的 BRDF 模型是 Phong 模型<sup>[4]</sup>。针对传统 Phong 模型存在能量不守恒以及无法描述菲涅耳现象等问题,本课题组采用改进型 Phong 模型<sup>[14]</sup>,其表达式为

$$f_r = \rho_d \cos \theta_i + \rho_s \frac{\cos^a \beta}{\cos^a \theta_i} \exp[-b (1 - \cos \beta)^{1/\pi}], \quad (5)$$

式中: $\rho_d$ 、 $\rho_s$  分别为材质的漫反射系数和镜面反射系数; $a$  为镜向指数; $\beta$  为反射矢量偏离镜面反射矢量的角度; $a > 0$ , 是用以调节菲涅耳现象强度的系数; $b > 0$ , 是用以调节镜面反射分量增降速度的系数; $\theta_i$  为入射矢量偏离表面法线矢量的角度。前期,本课题组测量了大量砷化镓(GaSa)、硅(Si)电池板以及卫星本体材料的 BRDF 值(波长范围 400~900 nm),并基于这些数据反演了卫星表面材料的 BRDF 模型参数,对应的模型参数如表 1 所示。

表 1 部分卫星表面材料的改进 Phong 模型参数

Table 1 Parameters of improved Phong BRDF model of some satellite surface materials

Material name	$\rho_d$	$\rho_s$	$\alpha$	$a$	$b$	Satellite component
Epoxy paint	0.3596	2.0990	509.8636	2.7775	1.8229	Antenna
Gold polyimide	0.0220	116.4397	1736.9000	1.2855	2.1884	Insulation layer
GaSa	0.0428	23.0067	2122.5000	2.1124	4.8569	Solar arrays
Si	0.0162	15.6653	2170.3000	2.3679	2.3208	Solar arrays
Al	0.0774	8.7556	389.9936	1.6878	4.4520	Metal connector

#### 3.2 帆板的散射特性

高轨卫星由于功耗较大,通常需要很大面积的太阳能帆板供电。目前卫星上常用的太阳能帆板的材质主要有 GaSa 和 Si 两类,研究帆板的镜面反射特性必须首先分析这两种材质的散射特性。

从表 1 可以看出,两种材质的镜面反射系数  $\rho_s$  均较大,对应的漫反射分量较小,可知两种材料均为镜面反射材料。以  $30^\circ$  入射角为例,在镜面反射平面内,考察 BRDF 值随出射角度的变化规律,结果如图 2 所示。

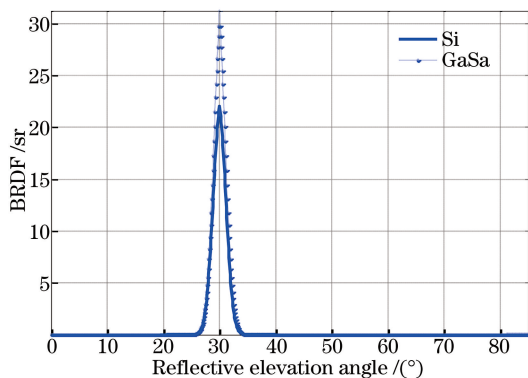


图 2 Si 与 GaSa 的 BRDF

Fig. 2 BRDF of Si and GaSa

从图 2 可以看出两种材料均为镜面反射材料,而对于研究镜面反射规律而言,除 BRDF 幅度外,更需关心其镜面反射的角度分布范围。对不同入射角度下的镜面反射角度宽度进行统计,以郎伯体材

料 BRDF 值(0.31)为参考,BRDF 值大于 0.31 判定为镜面反射,统计结果如图 3 所示。

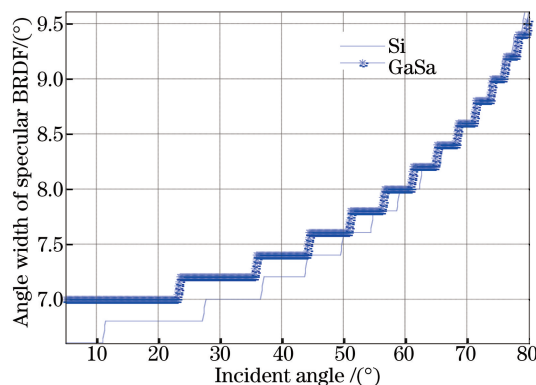


图 3 Si 与 GaSa 的镜面反射角度宽度

Fig. 3 Angle width of specular reflections of Si and GaSa

从图 3 中的曲线可以看出,随着入射角度(偏离表面法向的角度)的增大,镜面反射宽度也会逐渐变大,但变化范围不大。为便于后续开展定量分析,可取镜面反射范围的均值  $8^\circ$  作为镜面反射的宽度。需要强调的是,镜面反射宽度是从镜面反射峰值向两侧分别下降到 0.31 时对应的角度宽度,论文后续部分将基于该结论开展帆板镜面反射特点规律的研究。

以  $10 \text{ m}^2$  的砷化镓太阳能电池板为例(不考虑本体的散射),计算太阳光  $30^\circ$  入射条件下,距离 36000 km 处不同角度下的星等值(星等计算方法参考文献<sup>[4]</sup>),结果如图 4 所示。

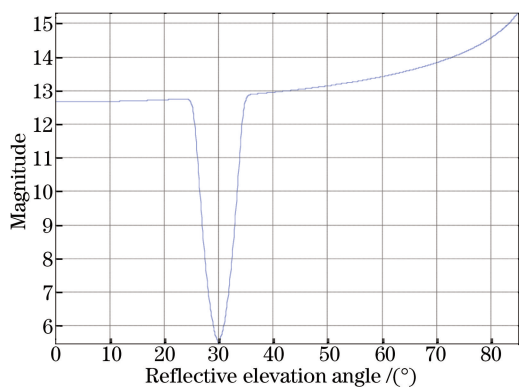


图 4 入射角为 30°时的 GaSa 帆板星等曲线

Fig. 4 Magnitude of GaSa solar arrays under incident angle of 30°

从结果可以看出,在镜面反射(30°附近区域)以外,目标亮度约为 13 星等,而在帆板的镜面反射范围内,目标迅速变亮,最小下降到 6 星等左右,意味着亮度增加了接近 600 倍,因此这种剧烈的亮度增加现象被称为闪光。

### 3.3 整星的光学散射特性

对于高轨卫星,本体最典型的部件为卫星的通信天线、相机等,本体其他部分为多层热控材料,典型的是金色聚酰亚胺薄膜,该材料是强镜面反射材料,可以阻止太阳光能量进入卫星本体内部。由于加工工艺不完善、卫星部件不平整等原因,这些薄膜表面易出现褶皱。表面褶皱化处理后,表面多层隔热材料的镜面反射特点将发生变化,散射能量会分布在较宽角度范围内。为提高光学散射特性计算的效率和准确性,采用前期提出的基于开放图形库(Open Graphics Library, OpenGL)拾取技术的目标散射特性计算方法<sup>[15]</sup>,根据反演的 BRDF 参数,实现对整体散射特性的快速计算。

将表面的金色聚酰亚胺薄膜进行褶皱处理(借鉴文献<sup>[16]</sup>中表面的褶皱处理方法),褶皱高度为 5 cm,天线部分为白漆,其他部分为铝。卫星本体为长 12 m 的立方体;一侧帆板的宽度为 5 m,长为 12 m。卫星模型及坐标系定义如图 5 所示。

设太阳从 +Z 方向入射,探测器在 YOZ 平面内,从 -Y 方向经 +Z 轴向 +Y 方向变化,观测距离为 36000 km,以星等形式分析卫星本体的散射特性,星等曲线如图 6 所示。

图 6 中的横坐标是观测矢量在 YOZ 平面内偏离 +Z 轴的角度(+Y 方向为正)。从仿真结果可以看出,除 0°(入射与出射方向相同,相位角为 0°)相位角附近存在一个较陡的尖峰外,其他地方的变化

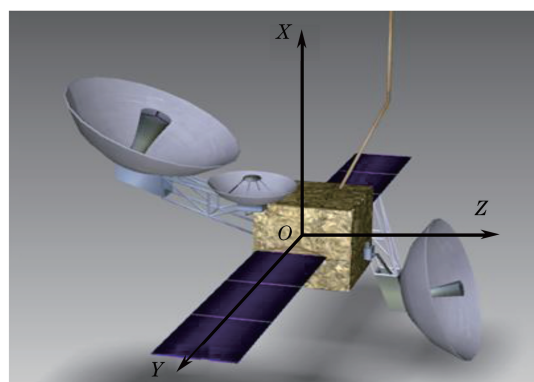


图 5 地球同步轨道通信卫星图片

Fig. 5 Picture of GEO communication satellite

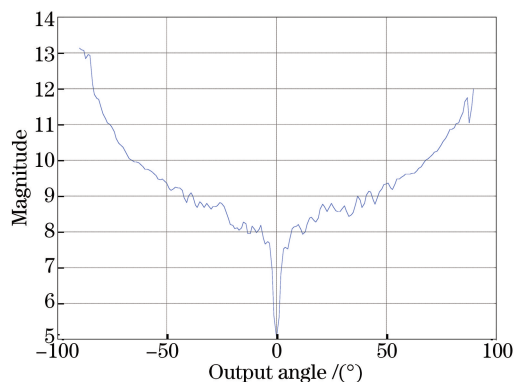


图 6 卫星的星等曲线

Fig. 6 Magnitude of the whole satellite

普遍较为平缓,具有漫反射材料的特点。因此在实际处理中,通常将本体视为漫反射材料<sup>[2]</sup>。另外,在相位角较小时,由于本体镜面反射效应,卫星也出现了较强的反射现象,这一结论在实际观测中也得到了证实<sup>[1-2]</sup>。

## 4 帆板运动条件下的卫星散射特性

### 4.1 帆板追踪太阳的运动特点

卫星的太阳能帆板是用来发电的,为了保持较高的发电能力,需要尽可能多的接收太阳能量。同时,在轨卫星需要保持特定姿态(以对地定向为主)以确保载荷指向固定目标,进而完成通信、侦察、数传等任务。此时卫星的帆板必须以卫星姿态为基准,通过调整帆板指向,使帆板朝向太阳的面积最大。在此,以图 7 所示的通信中继卫星为例,说明 GEO 卫星的运动特点。

卫星姿态模式为对地定向,其 Z 轴指向地心, X 轴指向速度方向, Y 轴指向帆板轴。卫星位置相对地面近似保持不动,此时帆板仅能通过绕 Y 轴旋转追踪太阳。设在卫星本体坐标下,帆板正面的法向矢量为  $r_{pp}(\theta_0)$ , 太阳的位置矢量为  $r_{ps}$ , 帆板转动

轴矢量为  $r_{pr}$ 。帆板追踪太阳的问题可以描述为:初始向量  $r_{pp}(\theta_0)$ ,绕旋转轴  $r_{pr}$  旋转角度  $\theta_\Delta$  得到新的矢量  $r_{pp}(\theta_1)$ 。为使帆板的受照射面积尽可能大,要求  $y(\theta_\Delta) = r_{pp}(\theta_1) \cdot r_{ps}$  取最小值。

根据任意轴旋转原理,可以推导得到  $y(\theta_\Delta)$  的表达式,令  $y'(\theta_\Delta) = 0$ ,即可得到需要旋转的角度  $\theta_\Delta$ 。

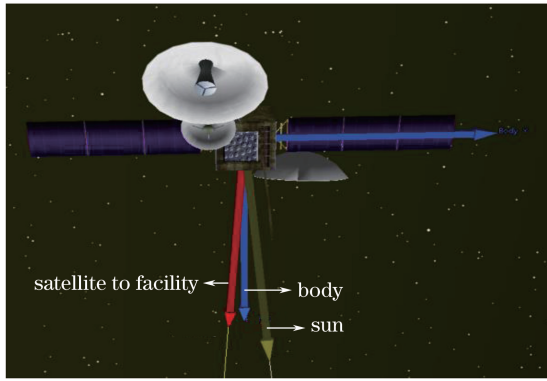


图 7 卫星光学观测中的几何关系

Fig. 7 Geometry relationship of satellite optical detection

对于 GEO 卫星,帆板轴通常处在本体坐标系的 Y 轴方向,该方向也垂直于地球赤道。由于日地距离较 GEO 卫星的高度要大得多,因此,在分析卫星本体坐标系下太阳角度时,可用太阳在地固系下的纬度代替太阳偏离卫星 XOZ 平面(赤道面的延伸平面)的角度,后续将基于这一条件开展定量分析。

#### 4.2 帆板闪光现象观测区域

确定了太阳在本体下的俯仰角(即太阳纬度)后,进一步分析测站在本体下的俯仰角,只有两者近似相等并分别处于赤道面两侧时,闪光现象才会发生。地球同步轨道距离地面 36000 km,地球半径  $R_e = 6378$  km,对纬度为  $L$  的测站而言,在卫星本体坐标系下,其与本体坐标系 Z 轴(由卫星质心指向地心)的夹角变为  $l$ (根据余弦定理),满足

$$\frac{\sin l}{R_e} = \frac{\sin(l+L)}{R_e + 36000}, \quad (6)$$

绘制两者的关系曲线如图 8 所示。

从分析结果可以看出,假设测站与卫星位于相同经度(虽然其他经度上测站观测闪光现象的时间在一天内的先后顺序有所差异,但是分析结论同样适用),地球测站与卫星的连线与卫星 XOZ 平面的最大夹角仅为  $8.2^\circ$ 。考虑到帆板 BRDF 镜面反射的角度宽度为  $8^\circ$ ,这一范围将扩展为  $12.2^\circ$ 。即只有太阳纬度在  $\pm 12.2^\circ$  以内时,地面测站才有可能观测到闪光现象。

根据这一特点,结合太阳纬度变化周期(如图 1 所示)可知,在以冬至点为起始点的一年时间内,地

面上共有 140 d 能够观测到闪光现象,分布在两个时间段内:即 55~124 d, 240~310 d,如图 9 所示。因此,这种闪光也可以称为季节性闪光。



图 8 不同纬度测站在卫星坐标系下的俯仰角

Fig. 8 Elevation angle of facility on different latitudes

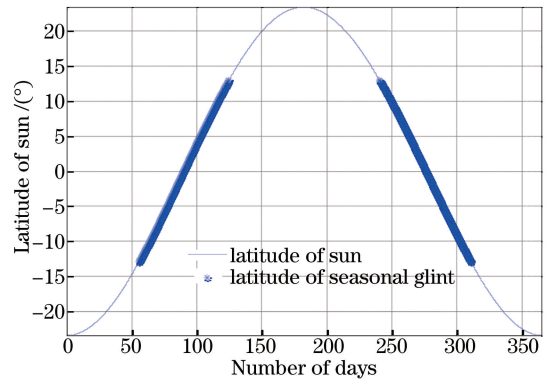


图 9 不同太阳纬度出现闪光现象的日期

Fig. 9 Glint date of different latitudes of sun

#### 4.3 地面测站观测闪光现象的时间

根据前文的分析可知,太阳每年在冬至点附近到达纬度最低点,随后经过半年时间逐步到达最高点,之后经过半年时间又返回最低点,周而复始。由于帆板的镜面反射能量集中在  $8^\circ$  范围内,因此闪光现象将在  $8^\circ$  范围内出现,期间帆板镜面反射能量被测站接收,即测站观测到该卫星的季节闪光。本节将进一步分析测站观测闪光现象的规律。

设太阳的纬度为:  $L_s = \arcsin\{\sin[\lambda_s(d)]\sin \epsilon\}$ , 其中  $\lambda_s(d)$  为太阳的赤纬,以每年冬至为起点的一年时间为一个周期,采用正弦函数对赤纬进行拟合,令

$$M = 357.5356 + 359.99049 \times d/365.25, \quad (7)$$

$$\lambda_s(d) = M + 6892'' \sin M + 72'' \sin(2M) + c, \quad (8)$$

式中:  $d \in [0, 365.25]$  为冬至日起算的天数,  $c$  为常数。

设  $d_0$  天测站观测到卫星的镜面反射最强点,  $d_1$  天结束镜面反射,太阳的纬度分别为  $\lambda_s(d_0)$ 、 $\lambda_s(d_1)$ ,则根据帆板 BRDF 镜面反射宽度为  $8^\circ$  的条

件可知  $\lambda_s(d_1) - \lambda_s(d_0) = 4$ 。

$\lambda_s(d_0)$ 可直接由曲线查表获知,在此基础上,纬度分别上溯、下溯  $4^\circ$ ,分别找到对应的天数,天数之和即为该测站观测到闪光现象的时间,分析结果如图 10 所示。

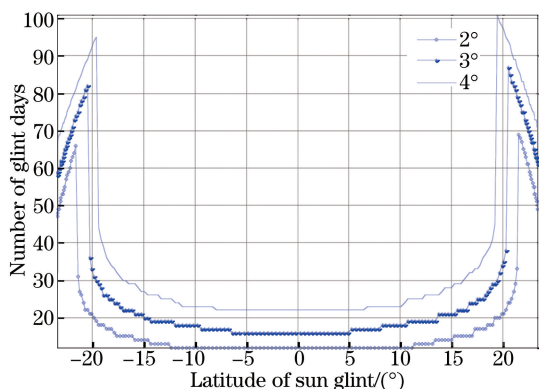


图 10 不同太阳纬度出现闪光现象的天数

Fig. 10 Number of days of different latitudes of sun

在图 10 中,假设 BRDF 镜面反射宽度分别为  $2^\circ, 3^\circ, 4^\circ$ ,分析不同太阳纬度时刻的闪光观测时间。以  $4^\circ$  为例,只有在太阳纬度在  $\pm 12.2^\circ$  之间时,地面才有可能观测到闪光现象。同时,从图 10 可以看出,地面测站无论在什么地方,只要能够观测到闪光现象,其可观测时间均在  $22 \sim 24$  d 之间,约 3 周的时间,这一结果与实际观测的结果是一致的<sup>[11-12]</sup>。

总结本节分析,如果需要分析某一测站能否观测到季节闪光现象,只需求解该测站观测闪光现象对应的太阳纬度,根据(7)式找出该纬度上下  $4^\circ$  所对应的时间范围即可。以北京所在的北纬  $40^\circ$  为例,根据(6)式可知,当太阳的纬度角在  $-2^\circ \sim -10^\circ$  之间时可以观测到闪光现象。依据(7)、(8)式及图 10 可知,该测站能够观测到闪光现象的日期为冬至点后  $63 \sim 84$  d,以及  $281 \sim 302$  d,共有两个观测弧段,每次约 21 d。必须抓紧这两个时间段进行观测,否则将无法观测到季节性闪光现象。

如果地面测站能够观测到闪光现象,单次观测的时长则由地球自转速度和帆板的 BRDF 镜面反射宽度决定。地球每 24 h 转动  $360^\circ$ ,由于帆板 BRDF 镜面反射的角度仅为  $8^\circ$ ,则每次闪光观测时长  $\Delta t = 24 \times 60 \times (8/360) = 32$  min,即每颗卫星的观测时间长度仅有 32 min。

## 5 仿真验证

为验证论文结论的正确性,选取了 3 个场景分析卫星的星等变化情况:场景 1,设置测站为闪光中

心点;场景 2,调整测站的纬度,检验不同测站观测闪光现象的规律;场景 3,调整星历时间,检验闪光与日期的关系是否正确。

### 5.1 场景 1

设计场景如下:卫星定点于东经  $120^\circ$  的地球同步轨道上,地面测站的经纬度分别为  $(100^\circ, 24^\circ)$ ,仿真开始时间为世界协调时 2017 年 10 月 3 日 14 时 0 分 0 秒,结束时间为 2017 年 10 月 3 日 16 时 30 分 0 秒。利用 Satellite Tool Kit(STK)软件生成卫星本体坐标系下太阳、测站的时序坐标(几何关系及卫星外形如图 7 所示,卫星表面材料及 BRDF 参数如表 1 所示)并导入卫星星等计算程序中。

此时太阳的纬度为  $-4.1^\circ$ ,根据前文分析可知,此时镜面反射点的纬度为  $24^\circ$ ,考虑 BRDF 特点后,在地面上覆盖的纬度范围变为  $[0^\circ, 60^\circ]$ 。本组仿真中,测站纬度为  $24^\circ$ ,处于闪光观测中心区域。分别设置帆板不追踪太阳和追踪太阳 2 种情况进行分析,星等曲线如图 11 所示。

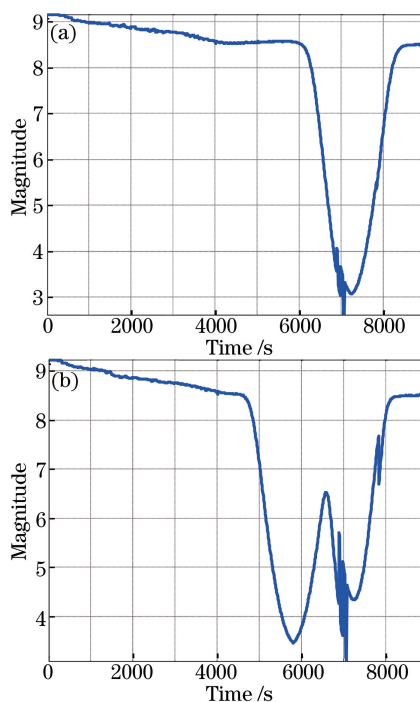


图 11 星等曲线对比。(a)帆板不追踪太阳时;  
(b)帆板追踪太阳时

Fig. 11 Magnitude curves of satellite.

(a) Solar doesn't track the sun; (b) solar tracks the sun

首先分析卫星帆板固定不动的情形,在 7200 s 时刻出现强烈镜面反射,其中既有本体的强烈镜面反射,也有帆板的镜面反射,星等值从 9 星等迅速变为 3 星等,出现闪光。当卫星帆板追踪太阳运动时,由于帆板不再保持不动,出现了 1 个帆板引起的闪

光。此时帆板不再参与本体的闪光,导致第 2 个本体闪光强度降低。本体闪光可以研究卫星的对地定向属性,但由于该现象与卫星本体结构、褶皱等诸多因素有关,不易开展定量研究,结论也难以指导实际观测。进一步统计图中帆板闪光的时间为 1960 s,即 32.67 min,与理论分析相符。

### 5.2 场景 2

将测站的纬度分别设为  $40^\circ$  和  $60^\circ$ ,经度不变。根据(7)式和(8)式可知, $40^\circ$ 时闪光强度会有所降低,而  $60^\circ$ 时闪光现象基本消失,两个场景的星等曲线如图 12 所示。

从结果可以看出,当测站位于纬度为  $40^\circ$ 时,仍然存在闪光现象,只是对应的闪光星等从原来的 3.5 变为 5 星等,闪光现象减弱。而当测站位于纬度  $60^\circ$ 时,星等已经变为 7.8 星等,闪光现象基本消失,结果证明了本文结论的正确性。

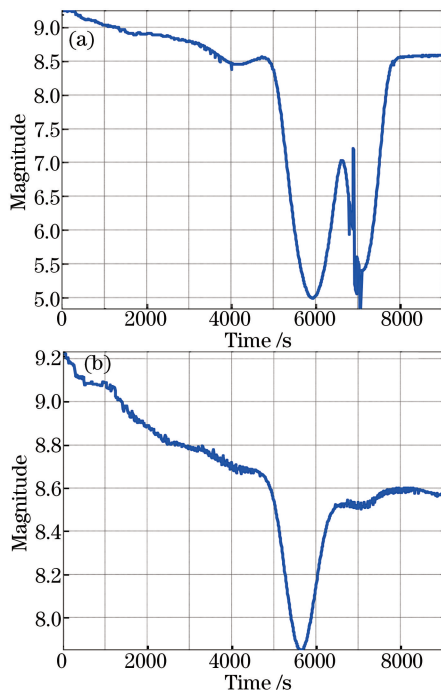


图 12 不同纬度测站观测到的星等曲线。

(a) 测站位于纬度  $40^\circ$ 时; (a) 测站位于纬度  $60^\circ$ 时

Fig. 12 Magnitude curves detected from different latitudes of facility. (a) Facility at  $40^\circ\text{N}$ ; (b) facility at  $60^\circ\text{N}$

### 5.3 场景 3

测站纬度重新设置为  $24^\circ$ ,将场景时间分别往后推移 10 d 和 20 d,即起始时间分别为世界协调时 2017 年 10 月 13 日 14 时 0 分 0 秒和 2017 年 10 月 23 日 14 时 0 分 0 秒,时间长度均为 2.5 h。两个场景的星等曲线如图 13 所示。

对于地面某一测站而言,闪光时间约为 21 d。

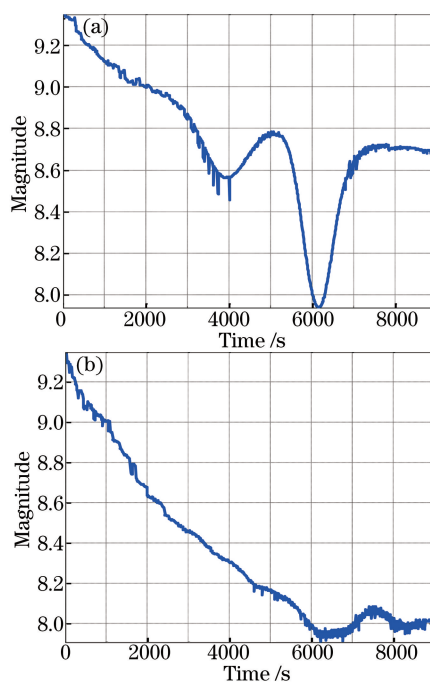


图 13 推测不同天数观测到的星等曲线。

(a) 推迟 10 d; (b) 推迟 20 d

Fig. 13 Magnitude curves detected in different delayed days. (a) 10 days delayed; (b) 20 days delayed

根据上述结论,10 月 3 日时测站处在镜面反射中心点,推移 10 d 后,闪光现象基本消失(能量显著减弱),而推移 20 d 后则无法观测到闪光现象。仿真结果验证了上述结论的正确性。

## 6 结 论

GEO 卫星的帆板闪光现象具有很强的规律性,是研究高轨卫星运动、工作状态的重要指标,掌握帆板闪光规律可以更好地在实际应用中观测 GEO 卫星并对其开展特性分析。结合卫星表面材料的光学散射特性及帆板运动规律,定量分析了闪光现象的规律、日期及季节,研究结论不仅解释了当前国内外测站观测到的闪光现象,更能够预测闪光现象出现的时间和地点。对于特定位置的测站,利用本文分析方法可以计算出其对特定 GEO 目标帆板闪光现象的观测日期和时间,可用于指导实际观测。

### 参 考 文 献

[1] Tang Y J, Jiang X J, Wei J F, *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 Y J, Jiang X J, Lu X M, *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] Hu M, Xu G R, Zhang H, *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.
- [4] Liu H, Du X P, Gou R X. 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.
- [5] Schildknecht T, Linder E, Silha J, *et al.* Photometric monitoring of non-resolved space debris and databases of optical light curves[C]//Proceeding of AMOS Technical Conference, 2015: 1-8.
- [6] Bédard D, Wade G A. Time-resolved visible/near-infrared spectrometric observations of the Galaxy 11 geostationary satellite[J]. *Advances in Space Research*, 2017, 59(1): 212-229.
- [7] Murraykrezan J, Inbody W, Dentamaro A, *et al.* Algorithms for automated characterization of three-axis stabilized GEOs using non-resolved optical observations[C]//Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2012: 1-6.
- [8] Chaudhary A, Payne T, Gregory S, *et al.* Fingerprinting of non-resolved three-axis stabilized space objects using a two-facet analytical model[C]//Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2011: 1-30.
- [9] Isobe S, Asami A, Asher D, *et al.* A new 1m telescope for space debris survey observations [J]. *Advances in Space Research*, 2004, 34(5): 917-920.
- [10] Bradley B K, Axelrad P. Lightcurve inversion for shape estimation of GEO satellites from space-based sensors[C]//Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2014: 1-20.
- [11] Crassidis J L, Hinks J C. Angular velocity bounds via light curve glint duration[C]//Proceedings of AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference, 2016: 1-12.
- [12] Hall D, Kervin P. Analysis of faint glints from stabilized GEO satellites[C]//Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2013: 1-8.
- [13] Oliver M, Eberhard G. Satellite Orbits: Models, Methods and Applications[M]. Wang J S, Zhu K J, Hu X G, Transl. 1<sup>st</sup> ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2012: 66-68.  
门斯布吕克, 吉尔. 卫星轨道-模型、方法和应用[M]. 王家松, 朱开建, 胡小工, 译. 1版. 北京: 国防工业出版社, 2012: 66-68.
- [14] Liu C H, Li Z, Xu C. A refined Phong model for fresnel reflection of the commonly using materials on space targets[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(10): 102901.  
刘程浩, 李智, 徐灿. 针对空间目标常用材质菲涅耳反射现象的改进 Phong 模型[J]. *激光与光电子学进展*, 2017, 54(10): 102901.
- [15] Xu C, Zhang Y S, Li P, *et al.* Calculation of optical cross section based on OpenGL picking technique[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(7): 0720001.  
徐灿, 张雅声, 李鹏, 等. 基于 OpenGL 拾取技术的空间目标 OCS 计算方法[J]. *光学学报*, 2017, 37(7): 0720001.
- [16] Shen W T, Zhu D Q, Shi L C, *et al.* Optical properties of sun synchronous orbit satellite [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2013, 39(1): 6-10.  
申文涛, 朱定强, 石良臣, 等. 太阳同步轨道卫星光学特性[J]. *北京航空航天大学学报*, 2013, 39(1): 6-10.