

两颗 GEO 卫星的季节性闪光现象分析*

赵晓芬¹ 毛银盾¹ 郑景辉¹ 董钦¹ 王鲲鹏² Yuldoshev Q.X.³

1(中国科学院上海天文台 上海 200030)

2(北京跟踪与通信技术研究所 北京 100094)

3 (Ulugh Beg Astronomical Institute of the Uzbek Academy of Sciences Tashkent 100052)

摘要 季节性闪光现象是地球同步轨道 (GEO) 卫星独特的一种现象, 得益于太阳光照条件和卫星太阳能帆板的运动特点产生。对闪光光度数据分析能获得有价值的特征信息。基于两颗 GEO 卫星 2024 年秋分后的闪光现象, 总结分析 GEO 卫星闪光的特点和闪光产生的原因, 根据其峰值特征和光度仿真分析太阳能帆板的偏置角 (offset) 和尺寸, 比较闪光前后的光度曲线规律及不同卫星的闪光强度差异。结果表明, 两颗卫星的闪光强度达到 5-6 mag, 明显大于其他卫星; 太阳能帆板 offset 约为 2° - 4° , 且可能存在帆板的指向变化; 太阳能帆板尺寸约为 25 m 和 15 m; 两颗卫星的季节性闪光现象主要来源于其超大太阳能帆板的镜面反射, 且与太阳赤纬角有关。分析结果可为目标的观测提供指导, 同时为目标特性分析提供参考。

关键词 GEO 卫星, 季节性闪光, 太阳能帆板 offset, 闪光强度分析

中图分类号 P171.3 P113

Analysis of Seasonal Glint Phenomenon of Two GEO Satellites

ZHAO Xiaofen¹ MAO Yindun¹ ZHENG Jinghui¹ DONG Qin¹

WANG Kunpeng² Yuldoshev Q.X.³

1(Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, 200030)

2(Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, 100094)

3 (Ulugh Beg Astronomical Institute of the Uzbek Academy of Sciences,

Tashkent, 100052, Uzbekistan)

Abstract Seasonal glint, a unique phenomenon of GEO satellites, is caused by the special solar illumination condition and the motion characteristics of solar panels. Ground-based optical telescopes routinely observe noticeable glints from GEO satellites. These glints can be remarkably bright, often exceeding several magnitudes.

Analysis on these glints can provide valuable characterization information of GEO

*全球共性挑战专项 (018GJHZ2022013GC) 和国家重点研发计划 (2025YFE0107000) 共同资助

satellites. Measured brightness, including the duration and amplitude of the glints, can be exploited to estimate the size and orientation of the solar panels. Characteristics of glint is firstly summarized based on the glints of two GEO satellites after the autumnal equinox of Year 2024. The glints of the two GEO satellites are much brighter, with amplitudes as big as 5 to 6 magnitudes. And these glints recur from night to night during a week span, but with subtle, incremental changes in both peak times and brightness. Next, the reason of glint is analyzed and the glint condition is displayed. Results show that the noticeable glints in each of these light curves are all caused by the specular reflections off the over-sized solar panels. And the seasonal glint is related to the declination of Sun. Significant glints can be observed at minimum solar phase angle when the declination of satellite is near that of Sun. Then, solar panel offset and size of solar panels of the two satellites are estimated from the peak feature of light curves by curve fitting and photometric simulation. The solar panel offset of two satellites may be 2° - 4° and 2° , and the size of solar panels may be 25 m and 15 m, respectively. Moreover, the light curve during glints is compared with that of before glints, and concludes that the brightness variation throughout glints is more dramatic than before glints. Finally, glint intensity of different satellites is compared and quantified. The glint intensity of these two satellites is significantly greater than those of the neighboring satellites. The results can provide guidance for observation planning and reference for GEO satellite characterization.

Key words GEO satellites; seasonal glints; solar panel offset; glint intensity analysis

0 引言

地球同步轨道(GEO)卫星是一类特殊的高轨目标,由于其定位性好、覆盖范围广等优势,能够实现对地面同一区域的全天时和全天候监测,因此该轨道分布了大量的价值资产,如通讯卫星、气象卫星、导航卫星等。由于距离较远,对 GEO 卫星的观测主要依靠地基光学系统,但地面测站难以实现对 GEO 卫星的高分辨率成像观测,因此 GEO 卫星的非分辨成像光学观测是获取目标信息的主要手段。通过观测可获取目标的时序光度信息,从而提供目标有价值的特征信息。如利用目标光度曲线的周期性特征可以估计不稳定 GEO 卫星的旋转速率,目标的时序光度变化也可以表征稳定 GEO 卫星的姿态。闪光是观察卫星光学特征的独特机会,可以深入了解 GEO 卫星上太阳帆板的组成、大小和方向^[1],获得有关目标工作状态的信息。

许多 GEO 卫星的光度曲线通常会在接近 0° 相位角时出现亮度峰值,该现象已被证明是由太阳能帆板的镜面反射引起的。在春分和秋分前后, GEO 卫星亮度变化剧烈,导致亮度的明显超出,通常达到几星等(2.5 星等表示亮度增加 10 倍)的幅度,我们称之为“闪光现象”。测量这些闪光的幅度和时间,可以估计太阳能帆板的大小、指向和排列方式,获得有关卫星发电和耗电能力的宝贵信息。国内外许多研究者对这一现象进行了研究,包括 GEO 卫星闪光现象发生的时间、形状、观测区域和持续时间以及引起闪光现象的原因、太阳帆板的指向反演和闪光发生前后的光谱变化等。Hall 对不同结构立方星的光度进行了研究,仿真获得了卫星闪光期间的光度曲线,发现卫星闪光期间的亮度超出可达 $2\sim 5\text{ mag}$ ^[1]。Vrba 等人通过几颗 GEO 卫星的闪光现象分析得出:在秋分后 3 周和春分前 3 周会出现一个闪光季节,这是因为地球同步 GEO 通信卫星配备了超大的太阳能电池板,在运行的最初几年里,这些太阳能电池板没有垂直指向太阳,而是存在一定的倾斜^[2]。Payne 等人并基于闪光时的太阳相位角反演了太阳能帆板的 offset,获得了太阳能帆板的 Offset 分布^[3]。国内徐灿等人也通过分析太阳运动、帆板材质散射特性和 GEO 卫星整体的散射特性,定量

研究了地面站观测帆板闪光线性的相关规律,结果显示,在地面任意测站每年都有两个时段能够观测到 GEO 卫星的闪光现象,每次持续约 21 天,每颗卫星每天的观测时间约 32 min^[4]。对闪光季节 GEO 卫星的光谱研究发现,闪光发生时光谱峰值会向可见光谱的蓝端移动至约 500 nm,闪光后光谱的峰值则返回到>550 nm 处,且闪光期间的光谱反射率与黑体差异较大,证实了大多数稳定 GEO 卫星闪光的主要来源是太阳能帆板^{[5][6][7][8]}。王阳等人对 GEO 目标光度曲线中的异常变化开展了仿真研究,结果发现,接近 0°相位角的亮度峰值是由太阳帆板的镜面反射引起的,两侧微弱的亮度峰值可能是由目标表面和天线中间区域的镜面反射引起的^[9]。Masters 等人通过时隔 8 年观测的两次闪光现象,分析了目标发生闪光时的相位角变化,发现太阳能帆板的指向随着卫星老化发生变化^[10]。

然而,除了来自太阳能帆板的闪光外,卫星还可能发生其他微弱的闪光现象,幅度小至 0.2 mag,且在单一测站的观测中重复出现,仅在峰值时间和幅度上有细微的增量变化,这些微弱闪光可能来自于卫星外围结构的某些部件^[11]。研究者也对这些微弱的闪光现象进行了研究,发现卫星外围结构上的反射性部件(如天线等)也会引起约 0.2 mag 的微弱闪烁^[12]。可见,GEO 卫星的微弱闪光现象可表征目标结构组成。此外,在空间目标的干涉测量中,GEO 卫星的微弱闪光还可以帮助干涉仪分辨约 0.2 m 的卫星组件^[13],在短时间尺度的偏振测量中也发现了与光学观测对应的微弱闪光信号,能够进一步确定引起微弱闪光现象的卫星部件的特性^[14]。总之,卫星的微弱闪光现象对目标特性的研究十分有益。

本文主要展示观测中发现的一些 GEO 卫星的闪光现象,特别是连续多天的闪光现象显示了卫星闪烁的演化过程。通过闪光现象分析卫星太阳帆板的 offset,并通过闪光前后的光度曲线比较,分析闪光前后的光度变化规律。最后比较不同卫星的闪光强度,分析闪光强度不同的原因。

1 闪光现象观测

本次的闪光现象是由内蒙古蒙东站的 FocusGEO II 型望远镜观测发现的。该望远镜是一台普测型的搜索型设备,具有较大的视场,可实现对地球同步带的扫描观测。观测图像中能明显看到目标逐渐变亮的过程,通过对观测图像的处理获得目标的时间序列光度,绘图分析卫星闪光发生的时间和引起闪光的原因。

1.1 观测设备

蒙东站 FocusGEO II 型望远镜是一台普测型光学望远镜,其视场较大,达到 10°×10°,每晚可观测目标数达到 200 余颗,能够实现对地球同步轨道带目标的扫描观测和编目。表 1 列出了该设备的性能指标参数。

表 1 观测设备性能参数

Table 1 Parameters of observation telescope

技术指标	参数
机架结构	一维赤道式
成像单元数量	1 套
	焦距: 202mm
光学参数	焦比: F1.35
	口径: D=150mm
探测器	QHY4040 CMOS, 4K×4K
像素大小	9μm
视场	10°×10° (100 平方度)
探测星等	15 mag (短曝光叠加至 8s)
可覆盖范围	1000 平方度(100°× 10°)
同步轨道扫描周期	约 20 min
管理目标数量	约 360 颗
站址	内蒙古呼伦贝尔

1.2 数据处理

图 1 示出了该望远镜观测的图像，图 1(a)为 2 号卫星 00002 所在视场的原始观测图像，图 1(b)为局部放大图。由于该望远镜视场较大，视场内有多颗 GEO 卫星，该卫星的亮度明显亮于多数 GEO 卫星。

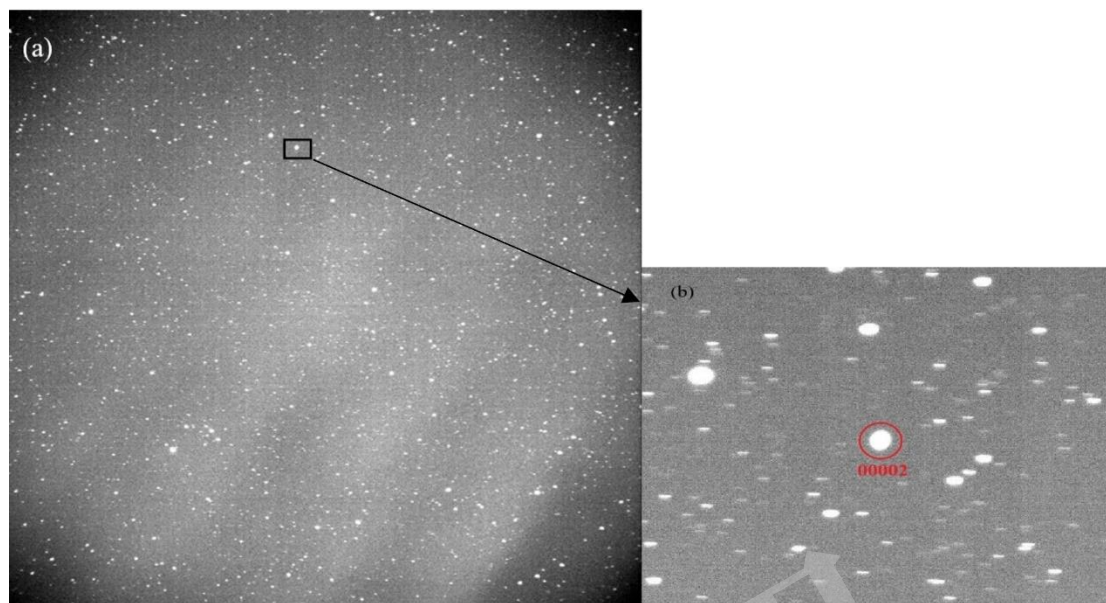


图 1 卫星 00002 所在视场原始观测图像(a)和局部放大图(b)

Fig.1 Original image of the field of view of satellite 00002(a) and local enlarged image(b)

图 2 为 GEO 卫星 00002 闪光最亮的一轮观测图像(a)-(g)，共 7 幅，可见目标逐渐变亮发生闪光的过程。

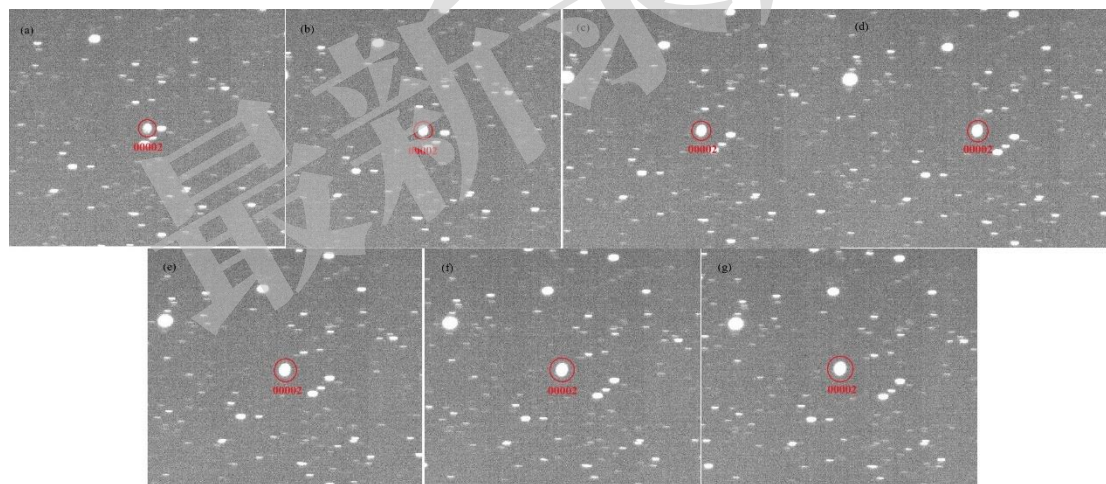


图 2 卫星 00002 闪光最亮的一轮观测图像示例

Fig.2 An example of the brightest glint observation images of satellite 00002

原始观测图像经过预处理、目标检测、关联和识别，计算获得目标的星等，绘图即可得到目标的星等曲线。由于该望远镜最初设计的主要目的是测角，因此未安装滤光片系统，观测获得的目标亮度均为白光星等，测光精度约为 0.2 mag。

1.3 闪光现象

秋分后，利用该望远镜观测到多颗 GEO 目标的闪光现象。大多 GEO 目标闪光引起的亮度峰值变化约 2~3 mag，但有些目标的峰值亮度变化达到 4~6 mag，明显超出了正常的亮度变化幅度。本文主要关注这些亮度明显超出的目标的闪光变化。此后，利用该测站望远镜对这几颗 GEO 卫星进行了持续的跟踪观测，均观测到目标的闪光现象，仅在峰值时间和亮度变化幅度上有细微的变化。本次闪光季节的观测时间跨度为 2024 年 9 月 26 日至 2024 年 10 月 7 日，共获得连续 8 晚的观测数据。

本文主要关注目标卫星 00001 和 00002，两个目标未公开编目，均采用自编号，表 2 示出了这两颗卫

星的平轨道根数信息，实际上这两颗星为同一系列的 A、B 星，两星构型相同。所有观测数据均使用蒙东站 FocusGEO II 型望远镜获得，测光处理获得目标的白光星等。

表 2 卫星 00001 和 00002 的平轨道根数

Table 2 Orbit elements of satellite 00001 and 00002

卫星编号	半长轴/(km)	偏心率	倾角/(°)	升交点赤经/(°)	近地点幅角/(°)	平近点角/(°)
00001	42165.064	0.0003759	12.1629°	8.2437	273.0812	107.4393
00002	42165.569	0.0002169	12.1487°	8.0975	269.3581	112.0071

首先对望远镜测光系统的测光精度进行评估。图 3 示出了观测期间两颗卫星的测光精度。可见，卫星 00001 的测光精度多数好于 0.2 mag，卫星 00002 的测光精度多数好于 0.19 mag，卫星 00002 的测光精度稍好于卫星 00001。因为两颗卫星位于不同天区，卫星 00001 在 Z12 天区，卫星 00002 在 Z04 天区，而 Z12 天区在最东边，仰角较低，大气消光影响严重，Z04 天区在中间位置，因此目标 00002 测光精度稍好。

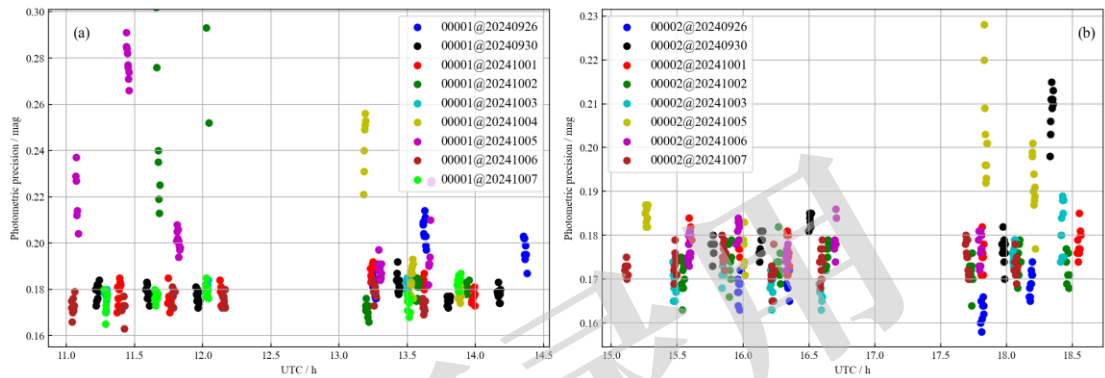


图 3 蒙东站连续 8 晚观测卫星 00001 和 00002 的测光精度

Fig.3 Photometric Precision of satellite 00001 and 00002 of 8 consecutive nights at Mengdong station

图 4 示出了两个目标观测期间的时序光度曲线，(a)图为 1 号卫星 00001 连续 8 晚的测光结果，(b)图为 2 号卫星 00002 连续 8 晚的测光结果，两子图中间的空缺是因为受地影的影响卫星不可见。由于该望远镜采用循环扫描的观测模式，约 20 min 扫描一轮，因此目标每两次观测会间隔约 20 min。由图可见，目标 00001 光度曲线中央的尖峰随观测日期越来越高，直至在 10 月 3 日观测到最亮的峰值，闪光引起的亮度变化达到了 5~6 mag（与非闪光期间最亮亮度 10.5~11.0 mag 比较），而后闪光逐渐变弱；最微弱的闪光出现在 9 月 26 日，此时闪光时段较宽，直至 10 月 3 日闪光最强，闪光时段最窄。目标 00002 光度曲线中央的尖峰则在 10 月 2 日达到最高点，闪光引起的亮度变化约 5~6 mag；同样地，最微弱的闪光出现在 9 月 26 日，直到 10 月 2 日，闪光最亮且最窄。

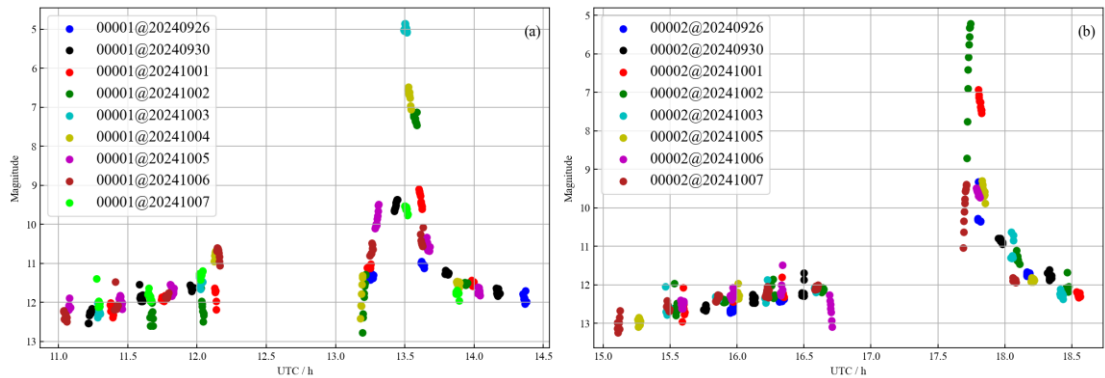


图 4 蒙东站连续 8 晚观测卫星 00001 和 00002 的光度曲线

Fig.4 Light curves of satellite 00001 and 00002 of 8 consecutive nights at Mengdong station

为了分析目标闪光时刻与相位角的关系，计算两个目标的相位角，绘制其相位角序列光度曲线，如图

5 所示。

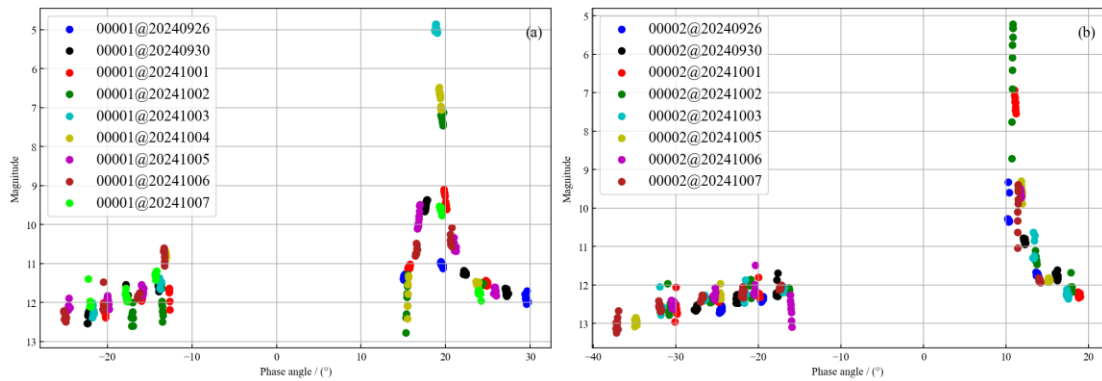


图 5 蒙东站连续 8 晚观测卫星 00001 和 00002 的相位角序列光度曲线

Fig.5 Phase angle light curves of satellite 00001 and 00002 of 8 consecutive nights at Mengdong station

分别对两颗卫星闪光时的峰值亮度、峰值亮度时刻、峰值亮度相位角、目标赤纬和太阳赤纬角进行统计，结果如表 3 和表 4 所示。

表 3 1 号卫星 00001 的观测数据统计

Table 3 Statistical observation data of satellite 00001

观测日期	不可见时段 /(UTC)	峰值亮度 /(mag)	峰值亮度时刻 /(UTC)	峰值亮度相位 角/(°)	目标赤纬 /(°)	太阳赤纬 角/(°)
20240926	12:10~13:13	10.957	13:36	19.40	-4.89	-1.63
20240930	12:11~13:13	9.363	13:26	17.77	-4.58	-3.18
20241001	12:11~13:13	9.093	13:36	19.79	-3.85	-3.57
20241002	12:11~13:12	7.194	13:33	19.43	-3.70	-3.96
20241003	12:12~13:12	4.847	13:29	19.80	-3.76	-4.35
20241004	12:12~13:11	6.609	13:31	19.29	-3.44	-4.73
20241005	12:13~13:11	9.490	13:18	16.90	-3.94	-5.11
20241006	12:13~13:10	10.486	13:15	16.54	-3.88	-5.50
20241007	12:13~13:10	9.525	13:29	19.26	-2.90	-5.88

表 4 2 号卫星 00002 的观测数据统计

Table 4 Statistical observation data of satellite 00002

观测日期	不可见时段 /(UTC)	峰值亮度 /(mag)	峰值亮度时刻 /(UTC)	峰值亮度相位 角/(°)	目标赤纬 /(°)	太阳赤纬 角/(°)
20240926	16:42~17:45	9.317	17:48	10.30	-6.12	-1.70
20240930	16:43~17:45	10.785	17:57	12.12	-4.70	-3.26
20241001	16:43~17:44	6.931	17:48	11.03	-5.03	-3.64
20241002	16:44~17:44	5.209	17:44	10.83	-5.02	-4.02
20241003	16:44~17:44	10.628	18:02	13.26	-3.75	-4.42
20241005	16:45~17:43	9.294	17:49	11.82	-4.05	-5.18
20241006	16:45~17:42	9.539	17:47	11.72	-3.97	-5.57
20241007	16:46~17:42	9.396	17:42	11:48	-4.00	-5.95

对于目标 00001，由表 3、图 4(a)和图 5(a)可见，在闪光期间，卫星在 UT 12:13~13:11 之间位于地影中，测站约 1 hour 不可见；9 月 26 日至 10 月 4 日，目标均在 UT 13:30 左右亮度最亮，即在出地影后约 20

min 达到亮度峰值发生闪光（9 月 30 日和 10 月 3 日分别在出地影后 13 min 和 17 min 亮度最亮，是因为受观测模式所限，未采集到出地影后 20 min 时的观测数据），此时相位角约 19°，且闪光时的最亮亮度分别为 11.0、9.4、9.1、7.2、4.8、6.6 mag，可见闪光的最亮亮度逐渐变亮，至 10 月 3 日闪光亮度最亮达到 4.8 mag，10 月 4 日最亮亮度有所下降，为 6.6 mag；10 月 5 日开始约在 13:15 左右，即出地影后，亮度最亮（10 月 7 日未采集到刚出地影时的观测数据），此时相位角约 17°，10 月 5 日至 7 日最亮时的亮度分别为 9.5、10.5、9.5 mag，可见闪光时的最亮亮度有所下降。同时分析目标赤纬与太阳赤纬角的关系，9 月 26 日至 10 月 4 日，卫星 00001 约在出地影后约 20 min 内亮度最亮，此时目标的赤纬角与太阳赤纬角最接近，10 月 5 日后随着太阳赤纬角的增大，目标赤纬角与太阳赤纬角相差越来越大，目标变为在刚出地影太阳相位角最小时最亮。

对于目标 00002，由表 4、图 4(b)和图 5(b)可见，在闪光期间，卫星在 UT 16:45~17:45 之间位于地影中，测站约 1 hour 不可见；9 月 26 日至 10 月 7 日，目标均在 UT 17:45 左右亮度最亮，即在出地影后达到亮度峰值发生闪光（受观测模式所限，10 月 3 日在 UT 18:02 时亮度最亮，未采集到刚出地影时的观测数据），此时相位角约 11°，亮度最亮时的星等分别为 9.3、10.8、6.9、5.2、10.6、9.3、9.5、9.4 mag，可见最亮时的星等先逐渐减小，至 10 月 2 日达到最亮约 5.2 mag，而后最亮时的亮度有所下降。进一步分析目标赤纬与太阳赤纬角的关系，卫星 00002 约在刚出地影后亮度最亮，此时目标的太阳相位角最小；随着闪光亮度的增加，目标的赤纬角与太阳赤纬角越来越接近，相位角也最小，同时在相位角最小和赤纬角最接近时亮度最亮。特别是 10 月 2 日，目标闪光时的亮度变化为 8.7-7.7-6.9-6.4-6.0-5.7-5.5-5.3-5.2 mag，卫星在 90 s 时间内亮度变化 3.5 mag，观测到了卫星闪光时亮度变化的过程，为闪光现象和原因分析提供了宝贵的数据。

2 闪光现象分析

2.1 闪光分析

两颗卫星均在秋分后的 1~2 周内光度变化异常，发生闪光现象。卫星 00001 在 10 月 4 日出地影后亮度由 11 mag 亮度突变至 6.5 mag 再变至 11 mag，变化幅度达到 4.5 mag，其中在 10 月 3 日出地影后 20min 时亮度达到最亮的 4.8 mag，变化幅度可达 6.0 mag；00002 在 10 月 2 日出地影后亮度逐渐由 8.7 mag 突变至 5.2 mag 再突变至 11 mag，变化幅度达到 6.0 mag，在 17:43 这一轮观测中，发现目标的完整变亮过程。

两颗卫星的亮度突变时间不同，（1）目标 00001 在 UT 13:30 左右亮度最亮，约在出地影后约 20min，此时目标赤纬角与太阳赤纬角最接近，但相位角不是最小时；（2）目标 00002 在 UT 17:48 左右亮度最亮，在刚出地影后即亮度最亮，此时相位角最小，且目标赤纬角与太阳赤纬角最接近。因此，两颗卫星均在目标赤纬角与太阳赤纬角最接近时亮度最亮，即卫星的赤纬角接近太阳赤纬角时，在地影之外的小相位角处观测到显著的 GEO 卫星闪光现象，这与 Vrba 文献中的结论相一致。因为大多数 GEO 卫星的赤纬略小于-5°，而在秋分后 3 周的太阳赤纬角也在-5° 上下，导致 GEO 卫星上配备的超大太阳能帆板发生镜面反射，因此会出现一个闪光季。同时由于 GEO 卫星的太阳能帆板没有垂直指向太阳（即存在太阳能帆板 offset），从而有效地将闪光现象的观测几何条件转移到地影之外^[2]，为地面观测闪光现象创造了有利条件。

2.2 闪光发生的条件

闪光时卫星亮度的显著增加已经证实来源于太阳能帆板的镜面反射，此时应满足相应的镜面反射条件：入射太阳光的角度等于反射到观测者的出射角，即平面的法向与相位角的二等分线一致^[12]。相位角的二等分线 $\mathbf{u}_h^l$ 为卫星-太阳和卫星-观测者的单位方向矢量，

$$\mathbf{u}_h^l = \frac{\mathbf{u}_{\text{sun}}^l + \mathbf{u}_{\text{obs}}^l}{\|\mathbf{u}_{\text{sun}}^l + \mathbf{u}_{\text{obs}}^l\|} \quad (1)$$

其中， $\mathbf{u}_{\text{sun}}^l$ 和 $\mathbf{u}_{\text{obs}}^l$ 分别为惯性参考坐标系中卫星-太阳和卫星-观测者的单位方向矢量。由此，可将 t 时刻平面发生闪光的几何条件表示为：

$$\mathbf{u}_h^l(t) \cdot \mathbf{u}_h^l(t) = 1 \quad (2)$$

其中， $\mathbf{u}_h^l(t)$ 为 t 时刻惯性参考坐标系中闪光平面的单位法向矢量。实际上，当平面法线 $\mathbf{u}_h^l(t)$ 和相位角的二等分线 $\mathbf{u}_h^l(t)$ 接近时，近似满足镜面反射条件，反射也会显著增强，因此当

$$\mathbf{u}_h^l(t) \cdot \mathbf{u}_h^l(t) \approx 1 \quad (3)$$

时也会发生闪光现象。

其他形状的卫星部件在满足镜面反射条件时，也会发生闪光现象。例如，当圆柱体的轴线与相位角二等分线垂直时，其亮度也会突然大幅增加，此时的几何条件可表示为：

$$\mathbf{u}_c^l(t) \cdot \mathbf{u}_h^l(t) = 0 \quad (4)$$

其中， $\mathbf{u}_c^l(t)$ 为沿圆柱体轴线方向的单位矢量。

因此，对立方体卫星而言，当帆板表面的法向应与相位角的二等分线近似一致时，卫星发生闪光；对于圆柱状卫星，相位角的二等分线与圆柱的轴线垂直，卫星发生闪光。

2.3 闪光理论分析

基于目标满足的镜面反射几何条件可以计算出发生理想闪光时的亮度。根据 Vrba 等人的分析，假设目标为一平面反射镜，则从目标反射的光等于平面反射镜反射的太阳角面积的光，但由于日地距离远大于平面反射镜大小，因此反射到地球的光斑的大小几乎完全取决于太阳视角度的大小^[2]。从地球上看到太阳的视直径约为 32'，因此目标反射的光束将辐射成一个 0.533° 的光锥。对于 GEO 轨道高度 36000 km，光锥在地面上的轨迹为直径约 335 km 的圆，闪光的整个直径大约需要 2 min 才能完全经过观测者^[2]。理论上，最佳闪光条件即为与太阳方向完全垂直的平面反射器发生闪光时，但此时处于地影期间，地面望远镜无法观测到这种闪光现象。

为了估计闪光表面的亮度，采用如下估计公式^[13]：

$$m - m_s = -2.5 \lg \left(\frac{\rho A}{\pi d^2 \theta_s^2} \right) \quad (5)$$

式中，A为闪光表面的面积， ρ 为反照率，d为目标与测站的距离， θ_s 为太阳的角半径， m_s 为太阳视星等，m为闪光视星等。

卫星 00001 距离地球表面约 39500 km，假设卫星上太阳能帆板的尺寸为 2 x 25 m，则从地球上看到，帆板的视角约为 10.4 mas x 130 mas。2024 年 10 月太阳的视半径约为 15.81'，太阳的视星等为 -26.74 mag，则一面反照率为 1 的平面反射镜预计会产生 -3.45 mag 的闪光。在本次观测中，当闪光以蒙东站为中心发生时，即投射到地球上的光斑的整个直径均经过该测站，则理想闪光的持续时间约为 2 min，对于观测采用的 15cm 望远镜来说，闪光持续的时间远小于 1s。然而，该卫星观测到的闪光强度约 5~6 mag，且持续时间长达约 45 min，目标才恢复到正常的漫反射强度。与理想闪光相比，卫星 00001 的闪光强度暗了约 8~10 mag，且闪光持续时间约为理想闪光的 20 倍，这说明发生镜面反射的目标表面不是平面镜，而是存在一定倾斜角度的平板，使得镜面反射的角度更大，地球上测站能观测到的闪光区域更宽，观测到的亮度也更暗^[2]。因此，反过来可通过比较闪光时长与理想闪光时长，确定太阳帆板的倾斜角度。

由此分析卫星 00001 和 00002 的情况。首先对两颗卫星闪光期间的光度曲线进行拟合，估计卫星的闪光时长。图 6 示出了卫星 00001 和 00002 的闪光期间的拟合光度曲线（仅对其中几天发生较强闪光的数据进行拟合），卫星 00001 和 00002 光度曲线拟合的均方根误差（RMSE）分别约为 0.15 mag 和 0.25 mag。可见，对于卫星 00001，10 月 1 日闪光从 UT 13:12 持续至 UT 14:00，闪光持续时间约为 48 min；10 月 2 日闪光从 UT 13:11 持续至 UT 13:57，闪光持续时间约为 46 min；10 月 4 日闪光从 UT 13:10 持续至 UT 13:55，闪光持续时间约为 45 min。这三晚观测的平均闪光时间为 46 min，为理想闪光（2 min）的 23 倍，因此光斑的投影角即为理想情况下（0.533°）的 23 倍，为 12.26°，即反射后为 ±6.13°，由此可导出太阳能帆板倾斜角度为 ±3.06°。10 月 5 日闪光从 UT 13:12 持续至 UT 13:44，闪光持续时间约为 32 min，为理想闪光（2 min）的 16 倍，因此光斑的投影角即为理想情况下（0.533°）的 16 倍，为 8.53°，即反射后为 ±4.27°，由此可导出太阳能帆板倾斜角度为 ±2.13°。对于卫星 00002，10 月 2 日闪光从 UT 17:36 持续至 UT 18:08，闪光持续时间约为 32 min；10 月 7 日闪光从 UT 17:39 持续至 UT 18:07，闪光持续时间约为 28 min，平均闪光时间约 30 min，为理想闪光（2 min）的 15 倍，因此光斑的投影角即为理想情况下（0.533°）的 15 倍，为 8.00°，即反射后为 ±4.00°，由此可导出太阳能帆板倾斜角度为 ±2.00°。

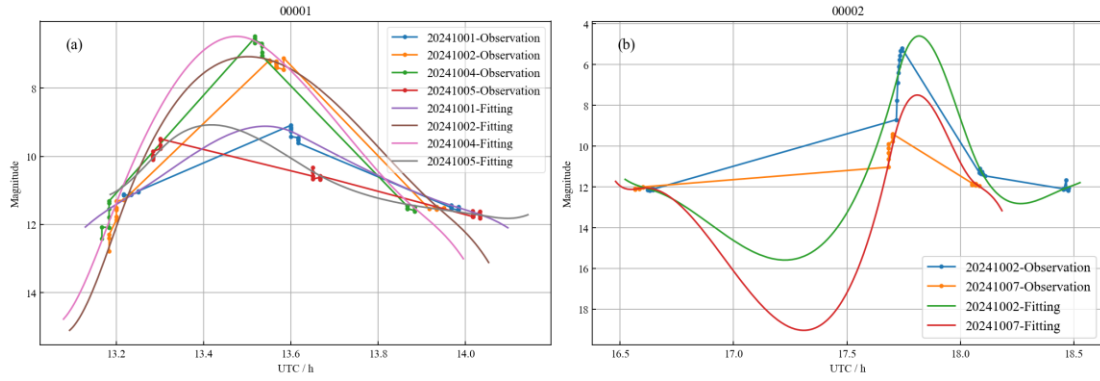


图 6 卫星 00001 和 00002 闪光期间的拟合光度曲线

Fig.6 Fitting light curves of satellite 00001 and 00002 during glints

目前卫星上常用的太阳能帆板材质主要是砷化镓 GaAs。分别仿真卫星 00001 和 00002 所在轨道高度不同大小砷化镓太阳能帆板的星等变化。因为两颗卫星轨道高度和发生闪光时的角度不同，将仿真分为两种情况：（1）假设在与卫星 00001 相同的 39500 km 的轨道上，太阳光入射角为 20° ，采用 2×25 m 的砷化镓太阳帆板；（2）假设在与卫星 00002 相同的 38400 km 的轨道上，太阳光入射角为 10° ，采用 2×15 m 的砷化镓太阳帆板。采用 Improved Phong 模型分别仿真两种情况下帆板的星等^[4]，结果分别如图 7(a)和图 7(b)所示。可以看到，情况（1）仅在反射角 20° 附近发生镜面反射，此时帆板最亮约为 4.8 mag，在镜面反射区域之外，帆板的亮度约为 11.8 mag；情况（2）帆板仅在反射角 10° 附近发生镜面反射，此时帆板最亮约为 5.3 mag，在镜面反射区域之外，帆板的亮度约为 12.2 mag。两种情况下，帆板镜面反射发生闪光引起的亮度变化均达到了 7 mag，亮度增加了 630 倍，此时仿真结果才与卫星 00001 和 00002 实测光度一致。

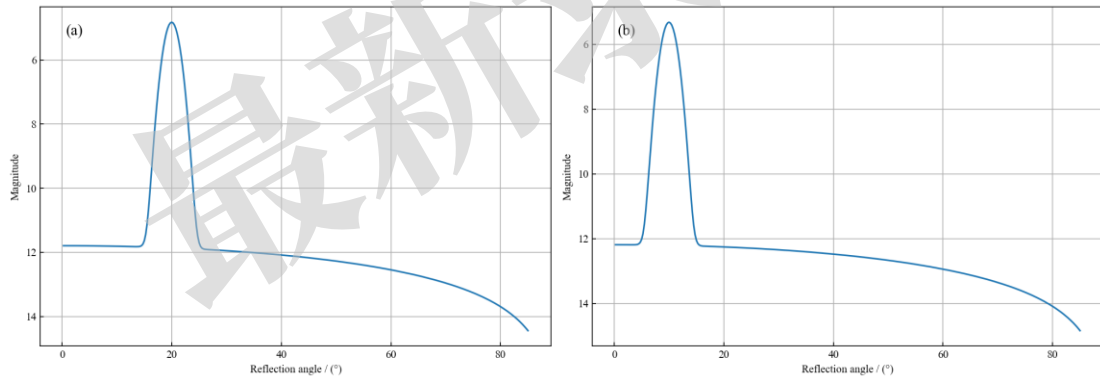


图 7 两种情况下不同大小帆板的星等变化. (a)情况 1：39500 km 的轨道上，太阳入射角为 20° ， 2×25 m 的砷化镓太阳帆板的仿真星等；(b)情况 2：38400 km 的轨道上，太阳入射角为 10° ， 2×15 m 的砷化镓太阳帆板的仿真星等

Fig.7 Light curves of different size of solar panel in the two cases. (a) Case1: Simulated magnitude of a 2×25 m GaAs solar panel orbiting at 39500 km with an incidence angle of 20° ; (b) Case2: Simulated magnitude of a 2×15 m GaAs solar panel orbiting at 38400 km with an incidence angle of 10°

反之，根据卫星的闪光现象可推算测站能观测到闪光现象的时间。对不同入射角度下砷化镓GaAs太阳帆板的镜面反射角度的统计发现，不同入射角的镜面反射宽度在 $7.5^\circ \sim 9.5^\circ$ 变化，即帆板的镜面反射能量集中在 $7.5^\circ \sim 9.5^\circ$ 范围内^[4]。假设 d_0 天测站观测到卫星帆板的镜面反射最强， d_1 天帆板镜面反射结束，对应的太阳纬度分别为 δ_0 和 δ_1 ，取镜面反射宽度均值为 8° ，可得 $\delta_1 - \delta_0 = 4^\circ$ 。如果需要分析某一测站能观测到季节性闪光现象的时间，只需求解该站观测闪光现象对应的太阳纬度，找出该纬度上下 4° 所对应的的时间范围即可^[4]。以蒙东站为例，卫星00001在10月3日的闪光（镜面反射）最强，当天的太阳赤纬角为 -4.3° ，当天太阳纬度分别上溯 4° 和下溯 4° ，即当太阳纬度在 $-8.3^\circ \sim -0.3^\circ$ 时蒙东站可观测到该卫星的闪光现象，计算2024年的

太阳赤纬角可知，该测站能够观测到闪光现象的日期为第60~80天，以及第268~288天，对应日期为2024年2月29日至3月20日和2024年9月24日至10月14日。同样地，卫星00002在10月2日的闪光（镜面反射）最强，当天的太阳赤纬角为 -4.0° ，当天太阳纬度分别上溯 4° 和下溯 4° ，即当太阳纬度在 $-8.0^\circ\sim 0.0^\circ$ 时蒙东站可观测到该卫星的闪光现象，计算2024年的太阳赤纬角可知，该测站能够观测到闪光现象的日期为第61~81天，以及第267~287天，对应日期为2024年3月1日至3月21日和2024年9月23日至10月13日。本次观测受天气因素影响，未观测到开始和结束时的闪光现象。

3 两颗卫星的太阳能帆板 offset

太阳能帆板 offset 指帆板法向与太阳方向的夹角。理论上，因为太阳绕着卫星做圆周运动，所有的太阳能帆板都应是直接指向太阳的。此时太阳能帆板 offset 为 0° 。然而，事实上，太阳能帆板的指向可能会存在偏移。为了确保卫星在设计寿命结束时有足够的发电能力，运营商可能会在发射时将太阳能帆板指向设置偏移以避免电子产品和面板材料的退化^[3]。因此，基于亮度峰值或对称中心相对于 0° 相位角的偏移量，可以检测出太阳能帆板 offset。基于闪光期间的目标光度的峰值特征可反演目标太阳能帆板 offset，但随着太阳赤纬角的季节性变化，亮度峰值会发生偏移，导致计算的太阳能帆板 offset 发生变化，因此首先修正太阳赤纬角的影响，得到目标亮度随修正角的变化曲线。

太阳赤纬角 δ 是太阳的地心矢量与赤道面的夹角，如图 8 所示。可以发现，由于地球自转轴的倾角，太阳赤纬角随季节变化在北回归线 $+23.45^\circ$ 和南回归线 -23.45° 之间变化^[15]。同一目标在不同太阳赤纬角的光照条件下，光度曲线也会存在差异。

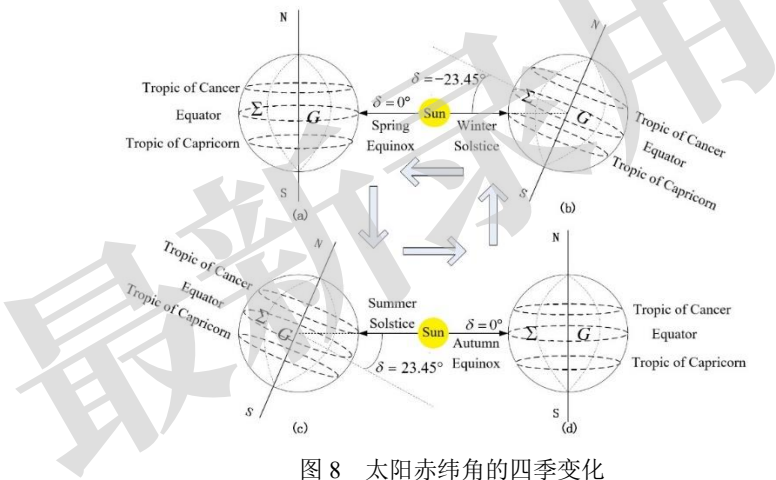


图 8 太阳赤纬角的四季变化

Fig.8 Seasonal change of solar declination

图 9 示出了 2024 年太阳赤纬角的变化图。图中红点标记出了闪光观测期间的太阳赤纬角，2024 年 9 月 26 日至 10 月 7 日，太阳赤纬角由 -1.6° 变化到 -5.9° 。

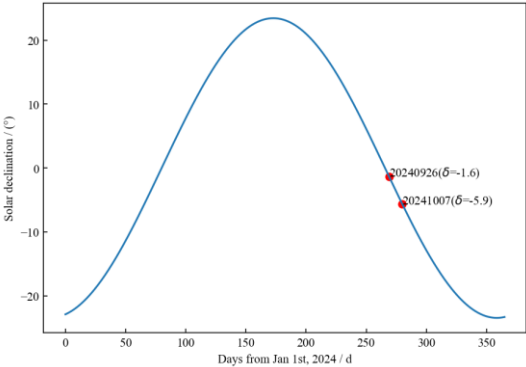


图 9 2024 年太阳赤纬角的变化

Fig.9 Solar declination of Year 2024

在秋分后连续 9 天的观测中，太阳赤纬角变化较大，因此首先对观测期间两颗卫星的太阳赤纬角进行改正^[16]，获得两颗卫星 00001 和 00002 的修正角序列光度曲线如图 10 所示。可见，卫星 00001 在进入地影前相位角 -12° 处有微弱的亮度起伏，约 0.4 mag，在相位角 $3^{\circ}\sim 5^{\circ}$ 亮度明显上升，至相位角 $8^{\circ}\sim 9^{\circ}$ 亮度最亮，而后亮度逐渐下降，且刚出地影时的亮度与进地影时的亮度接近，甚至略微暗于进入地影前的亮度；卫星 00002 进入地影前在相位角 $-16^{\circ}\sim -12^{\circ}$ 亮度有微弱起伏，约 1.0 mag，亮度逐渐变暗至 13.0mag ，在相位角 4.5° 时亮度最亮，而后逐渐变暗。

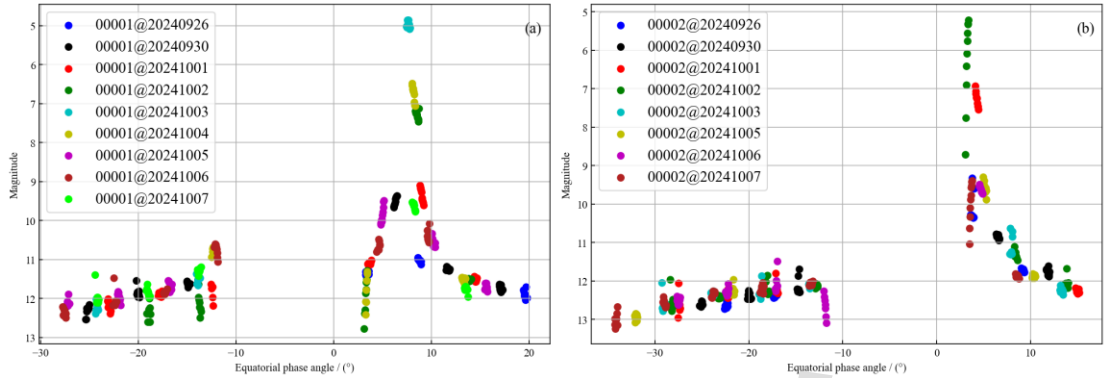


图 10 蒙东站连续 8 晚观测卫星 00001 和 00002 的修正角序列光度曲线

Fig.10 Equatorial phase angle light curves of satellite 00001 and 00002 of 8 consecutive nights at Mengdong station

两颗卫星均在偏离 0° 相位角处达到亮度峰值，说明卫星的太阳能帆板未正对太阳，而是存在一定的偏移，因此基于观测到的亮度峰值特征估计两颗卫星的太阳能帆板 offset^[16]，计算结果如表 5 所示，图 11 示出了各天观测太阳能帆板 offset 的变化。

表 5 两颗卫星的太阳能帆板 offset
Table 5 Solar panel offset of the two satellites

日期 目标	0926	0930	1001	1002	1003	1004	1005	1006	1007
00001	4.32°	3.23°	4.41°	4.37°	3.81°	4.02°	2.57°	2.37°	4.01°
00002	1.88°	3.15°	2.04°	1.69°	3.91°	-	2.47°	2.26°	1.88°

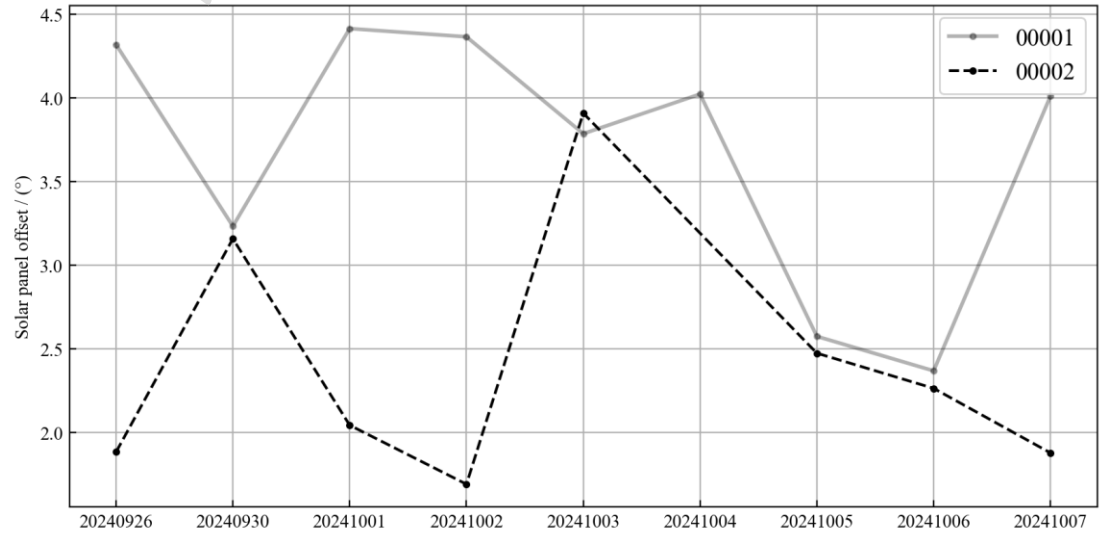


图 11 闪光期间卫星 00001 和 00002 的太阳能帆板 offset

Fig.11 Solar panel offset of satellite 00001 and 00002 during glints

由表 5 和图 11 可见，卫星 00001 在 9 月 26 日至 10 月 4 日的太阳能帆板 offset 较为接近，其均值约为 4.19° ，10 月 5 日至 10 月 6 日的太阳能帆板 offset 明显与 9 月 26 日至 10 月 4 日不同，其均值约为 2.47° 。需要注意的是，9 月 30 日闪光发生时正在变亮，采用的是观测到的最亮星等计算得到太阳能帆板 offset，分析可能因为未达到实际的最亮星等，因而偏差较大，在 offset 均值计算时未采用该数据；10 月 7 日因无刚出地影时的光度数据，计算采用的是出地影后 20min 最接近亮度峰值的数据，因此计算误差较大。同样计算可得 00002 的太阳能帆板 offset 均值约为 2.04° ，其中 9 月 30 日和 10 月 3 日因缺失刚出地影时的亮度数据，采用的是出地影后大约 10min 和 18min 亮度最亮时的光度和相位角，因此计算结果偏差较大。

结果显示卫星 00001 在 9 月 26 日至 10 月 4 日与 10 月 5 日后的太阳能帆板 offset 不同，分别约为 4.19° 和 2.47° ，由此分析该卫星可能有一次太阳能帆板指向调整的过程。而卫星 00002 始终在相位角最小处发生闪光，其太阳能帆板 offset 约为 2.04° ，并未发生变化。

与 2.3 节通过分析闪光时长与理想闪光时长差异确定的太阳帆板 offset 比较，结果如表 6 所示，发现两种方法估计的卫星 00001 的太阳能帆板 offset 存在差异，特别是 9 月 26 日至 10 月 4 日的太阳能帆板 offset 相差了 1.13° ，差异较大，但 9 月 30 日计算的太阳能帆板 offset 与闪光时长差异确定的太阳能帆板 offset 十分接近，仅相差了 0.17° ；而 10 月 5 日至 10 月 7 日的太阳能帆板 offset 相差了 0.34° ，较为接近。两种方法估计的卫星 00002 的太阳能帆板 offset 十分相近，仅差 0.04° ，说明了估计的准确性。卫星 00001 太阳能帆板 offset 差异较大的主要原因是受观测模式所限无法确定光度的准确峰值，仅采用实际观测到的光度峰值计算的结果存在偏差。

表 6 不同方法计算的太阳能帆板 offset 比较

Table 6 Comparison of solar panel offset of the two satellites with two methods

方法	卫星 00001(0926-1004)	卫星 00001(1005-1007)	卫星 00002(0926-1007)
闪光时长分析	3.06°	2.13°	2.00°
光度峰值分析	4.19°	2.47°	2.04°

4 闪光前后光度变化分析

为了分析闪光引起的目标亮度变化，比较两颗卫星闪光前后的光度。收集这两颗卫星的历史光度数据，与闪光季节的光度数据进行比较。图 12~图 14 分别绘制了卫星 00001 和卫星 00002 的历史时序光度曲线、相位角序列光度曲线和修正角序列光度曲线。

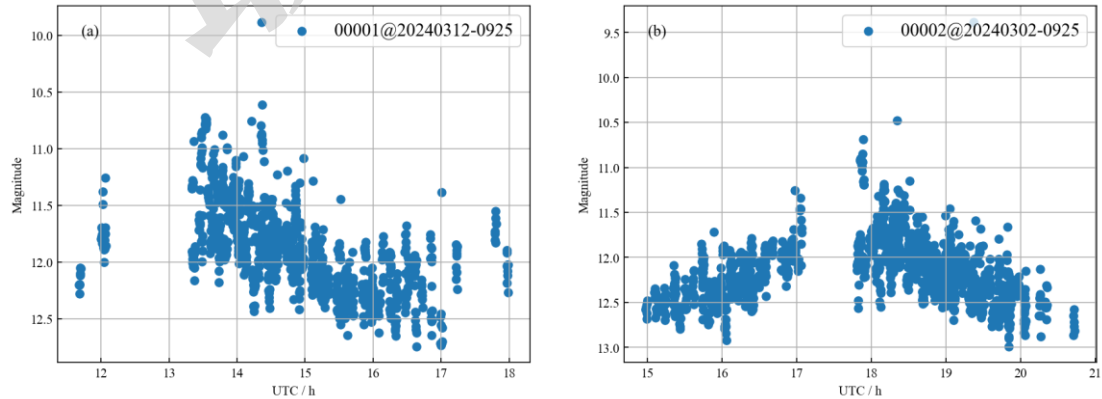


图 12 卫星 00001 和 00002 的历史时序光度曲线

Fig.12 Light curves of the satellite 00001 and 00002

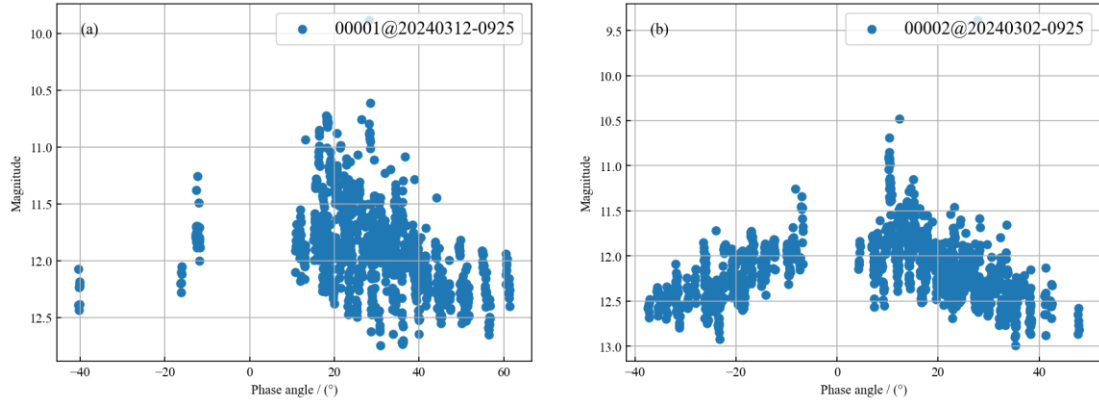


图 13 卫星 00001 和 00002 的历史相位角序列光度曲线

Fig.13 Phase angle light curves of the satellite 00001 and 00002

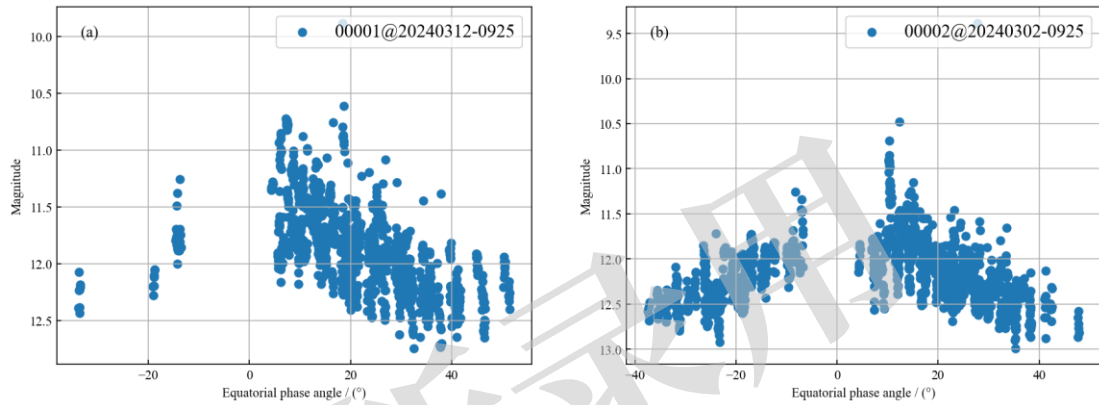


图 14 卫星 00001 和 00002 的历史修正角序列光度曲线

Fig.14 Equatorial phase angle of the satellite 00001 and 00002

目标 00001 的历史观测数据覆盖了 2024 年 3 月、5 月、8 月和 9 月，目标 00002 的历史数据覆盖 2024 年 3 月、4 月、5 月、8 月和 9 月。由图 12 和图 13 的历史叠加光度曲线可见，卫星 00001 的历史观测大多数集中在 UT 13:00~18:00，相位角主要覆盖 10°~60°（少量数据覆盖 -40°和 -20°~-15°），非闪光季节卫星 00001 的星等约为 12.5~10.5 mag；卫星 00002 的观测集中在 UT 15:00~17:00 和 UT 17:45~21:00，相位角主要覆盖 -40°~40°，非闪光季节卫星 00002 的星等约为 13.0~10.5 mag。结合图 4 和图 5，闪光期间卫星 00001 亮度约 12.5~5.0 mag，卫星 00002 亮度约 12.5~5.0 mag，比较可见，闪光季节两颗卫星的亮度整体亮于闪光发生前的亮度，约比非闪光季节亮度亮了 5.5 mag，目标整晚观测的亮度变化更大，且亮度峰值尖而高，卫星 00001 的闪光持续约 45 min，观测到卫星 00002 的闪光持续约 30 min。

同时基于目标的光度曲线对目标进行分类。由于闪光期间地影的存在导致两颗卫星的光度曲线不连续，无法准确判断目标光度曲线的类型。因为这两颗卫星历史光度数据中 3~8 月份数据较少，大多数数据仍集中在 8~9 月份，因此主要基于 8~9 月的光度数据分析目标光度曲线的类型。由图 14 可见，两颗卫星 8~9 月数据均显示出在相位角 0°附近有亮度峰值，峰值两侧亮度缓慢变化，在其他特定相位角没有明显的亮度极大值或极小值点，据此判断这两个目标的光度为常见的典型类^[17]。该类曲线的特征即为在 0°相位角亮度最亮，两侧亮度逐渐递减。但在 10 月份闪光季的观测中，卫星 00001 除了在相位角 0°附近的亮度峰值外，在相位角 -12°亮度也有微弱的起伏，约 0.4 mag；卫星 00002 也在相位角 -16°~-11°亮度有微弱起伏，约 1.0 mag。这些与典型类曲线的特征不完全相符，且其亮度峰值点有微小的偏移，具体目标分类仍需进一步分析。

5 卫星定位前后的光度变化分析

由于两颗卫星均在同步轨道上漂移，可能也会引起卫星亮度的变化。因此首先对目标的定位点变化进行分析，确定卫星的定位时间，然后对目标定位前后的亮度变化进行分析。

5.1 两颗卫星的定位点变化

基于蒙东站历史测角数据进行精密定轨后，计算目标的星下点经度，分析目标星下点经度的变化，大致确定目标的定位时间。图 15 和图 16 分别示出了卫星 00001 和 00002 在 2024 年 3 月 2 日至 9 月 25 日的星下点经度变化。

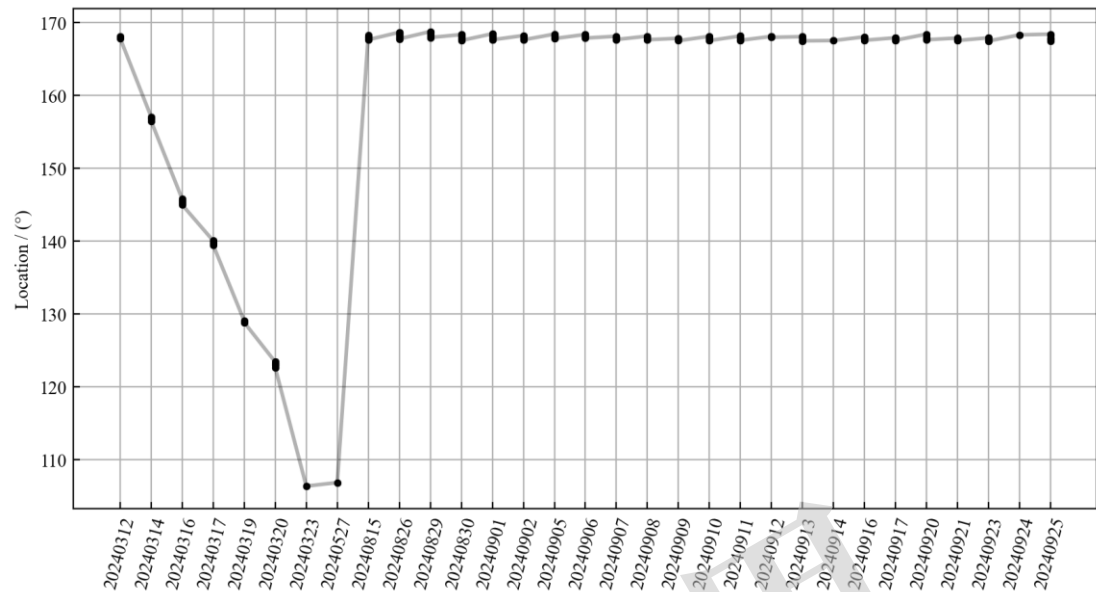


图 15 蒙东站观测卫星 00001 的定位点变化

Fig.15 Location of satellite 00001 observed at Mengdong Station

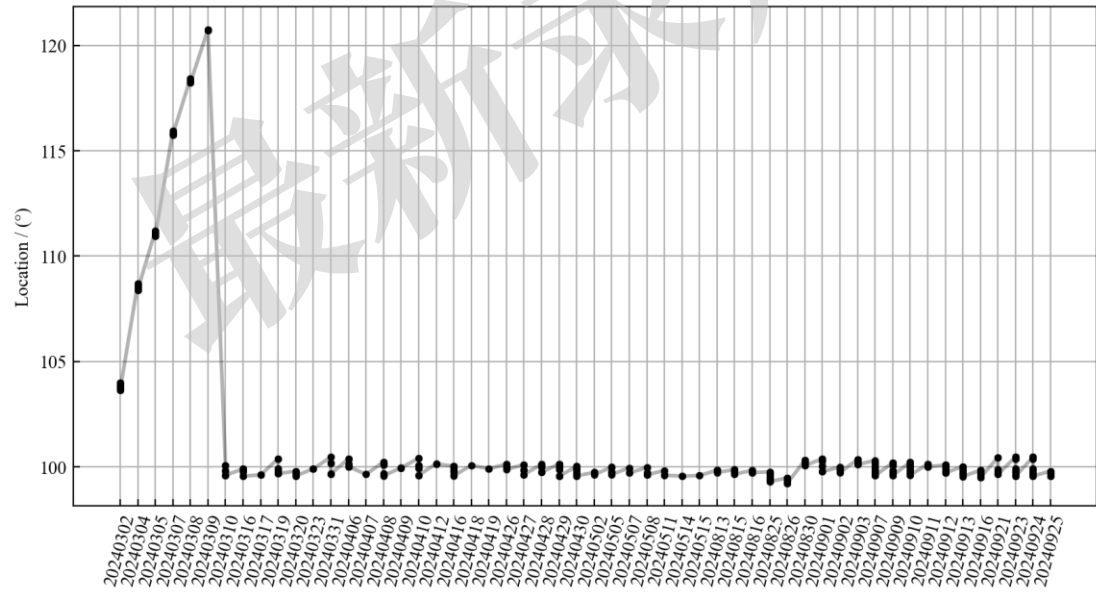


图 16 蒙东站观测卫星 00002 的定位点变化

Fig.16 Location of satellite 00002 observed at Mengdong Station

就蒙东站历史观测数据而言，目标 00001 大约在 2024 年 8 月 15 日左右定位在 168° E 附近，在 3 月 12 日至 5 月 27 日逐渐由 168° E 西漂到 107° E，5 月 27 日至 8 月 15 日逐渐由 107° E 东漂到 168° E，8 月 15 日之后一直维持在 168° E 附近。目标 00002 大约在 2024 年 3 月 10 日左右定位在 100° E 附近，在 3 月 2 日至 3 月 9 日逐渐由 104° E 东漂到 120.7° E，3 月 10 日之后一直维持在 100° E 附近。

5.2 比较两颗卫星定位前后的亮度变化

根据两颗卫星的定位时间，基于历史光度数据分析两颗卫星定位前后的亮度变化。

1) 卫星 00001 定位前后亮度分析

该卫星约在 8 月 15 日左右定位在 168°E ，因此分别对 8 月 15 日之前和之后的光度数据作图，分析其亮度变化。图 17 示出了卫星 00001 在 8 月 15 日前后的光度曲线。

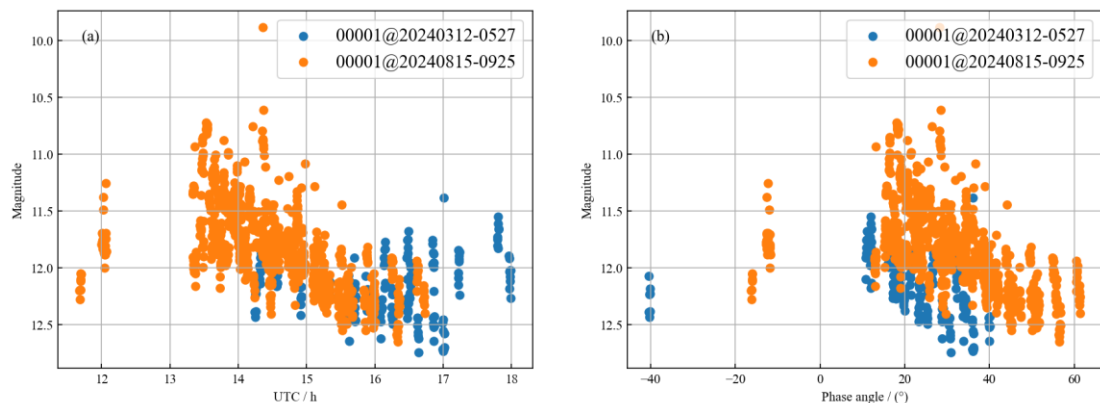


图 17 卫星 00001 定位前后的光度曲线

Fig.17 Light curve of satellite 00001 before and after positioning

卫星 00001 在定位前数据较为稀疏，漂移过程中定位点比较靠西，蒙东站观测的时间接近下半夜，星等大约在 $11.5\sim 12.7\text{ mag}$ ；8 月 15 日定位后，蒙东站观测的时间靠近上半夜，星等约为 $10.5\sim 12.6\text{ mag}$ 。可以看到，定位前的亮度比定位后稍暗，定位后的光度相比定位前在相位角上有明显的平移，这与目标的定位点发生变化有关，但整体的变化趋势一致。

2) 卫星 00002 定位前后亮度分析

卫星 00002 约在 3 月 10 日左右定位在 100°E ，因此分别对 3 月 10 日之前和之后的光度数据作图，分析其亮度变化。图 18 示出了卫星 00002 在 3 月 10 日前后的光度曲线。

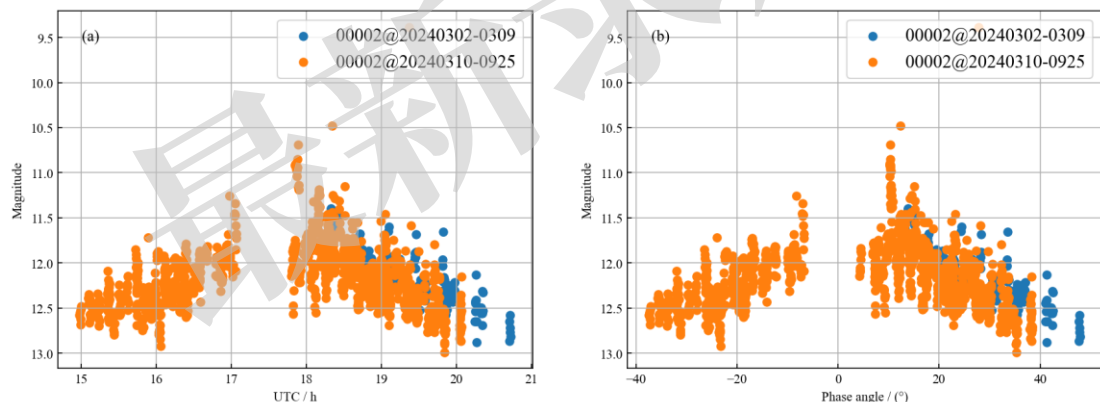


图 18 卫星 00002 定位前后的光度曲线

Fig.18 Light curve of satellite 00002 before and after positioning

卫星 00002 约在 3 月 10 日左右定位在 100°E 附近，定位较 00001 早，定位前数据较少，漂移的过程中定位点比较靠东，星等大约在 $11.5\sim 13.0\text{ mag}$ ；3 月 10 日定位后，星等约为 $10.5\sim 13.0\text{ mag}$ 。同样地，定位前的亮度比定位后稍暗，定位后的星等相比定位前在时间和相位角上有明显的平移，但整体的变化趋势一致。

6 不同卫星的闪光强度分析

6.1 与 BD GEO 卫星的闪光强度比较分析

在秋分后的闪光季，该时间段内蒙东站的 FocusGEO 望远镜也观测到了其他 GEO 卫星的闪光现象。图 19(a)绘制了北斗 2 号 GEO 卫星 41586 闪光期间的光度曲线。同样与其历史光度数据比较，分析闪光前后的光度变化。图 19(a)示出了该卫星在 5 月 9 日至 8 月 8 日的光度曲线。

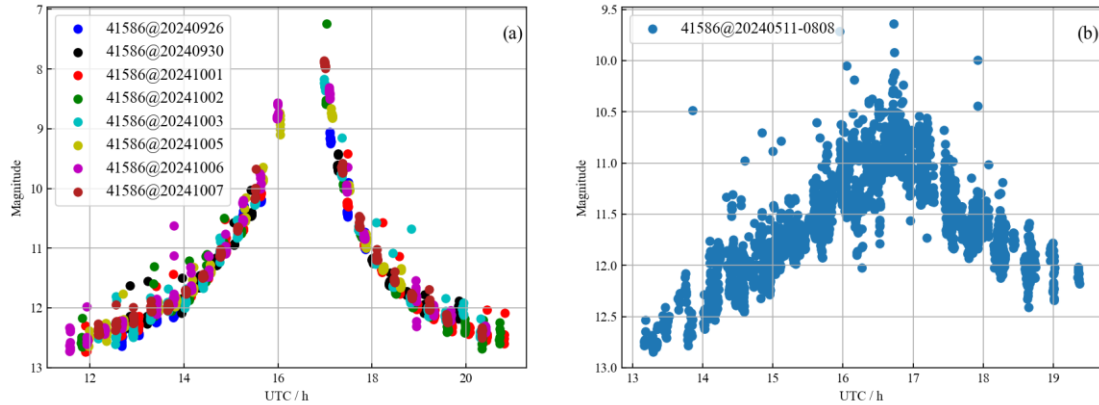


图 19 北斗 GEO 卫星 41586 闪光期间和闪光前的光度曲线

Fig.19 Light curve of Beidou GEO satellite 41586 during glint and before glint

比较图 19(a)和图 19(b)可以发现，闪光发生前，北斗 GEO 卫星 41586 的亮度约为 9.5~13.0 mag，而闪光期间卫星亮度约为 7.0~13.0 mag，闪光期间卫星亮度明显亮于闪光前，约亮了 2.5 mag，且闪光期间的亮度峰值更为尖锐，亮度弥散更小；闪光期间光度曲线的斜率较大，且随着时间变化，有明显的对数函数轮廓，而闪光前的光度曲线斜率较小，且不随时间发生变化，呈现倒“V”型，类似绝对值函数轮廓。由此可见，闪光期间目标的光度会呈现明显不同的变化趋势，亮度变化更快更集中。

比较闪光期间北斗 GEO 卫星与卫星 00001 和 00002 的亮度，发现卫星 00001 和 00002 在闪光期间的亮度增加达到 5.5 mag，而 BD GEO 卫星的亮度增加约 2.5 mag，卫星 00001 和 00002 的亮度增加超出了正常的亮度增加幅度，存在明显的亮度异常，初步分析一种可能是卫星上除太阳帆板发生镜面反射外，存在其他的大型部件发生类似的镜面反射，另一种可能是卫星携带了超大的太阳能帆板引起了强烈的镜面反射。

理论上，卫星光学星等增加 1，对应目标尺寸为 1.58 倍 ($10^{0.2}=1.58$)，若星等增加 5~6 mag，其相应的尺寸应为 10~15.8 倍。根据卫星各种典型部件的亮度统计发现，本体表面的镜面反射引起的亮度可达 0.2~0.5 mag，天线的镜面反射引起的亮度变化约为 0.8~1.0 mag，太阳能帆板的镜面反射引起的亮度变化约为 4 mag，且三者发生镜面反射的时刻不同^[9]，由此分析极有可能是目标表面覆盖了超大的太阳能帆板导致的目标亮度的急剧变化，根据图 7 的仿真结果分析，卫星 00001 和 00002 表面的太阳能帆板可能达到了 25 m 和 15 m 的长度。

6.2 与邻近卫星的闪光强度比较分析

同步分析闪光期间卫星 00001 和 00002 同一视场中其他目标的亮度变化情况。检查是否有其他卫星发生了类似的亮度增加。

在卫星 00001 邻近的目标中，卫星 43633 和 50005 均有类似的星等异常变化，在某个时刻出现明显的亮度超出，图 20 示出了闪光期间两颗卫星 43633 和 50005 的时序光度曲线。可见，卫星 43633 在 10 月 3 日与 10 月 7 日亮度变化剧烈，卫星 50005 在 10 月 6 日与 10 月 7 日亮度变化剧烈。

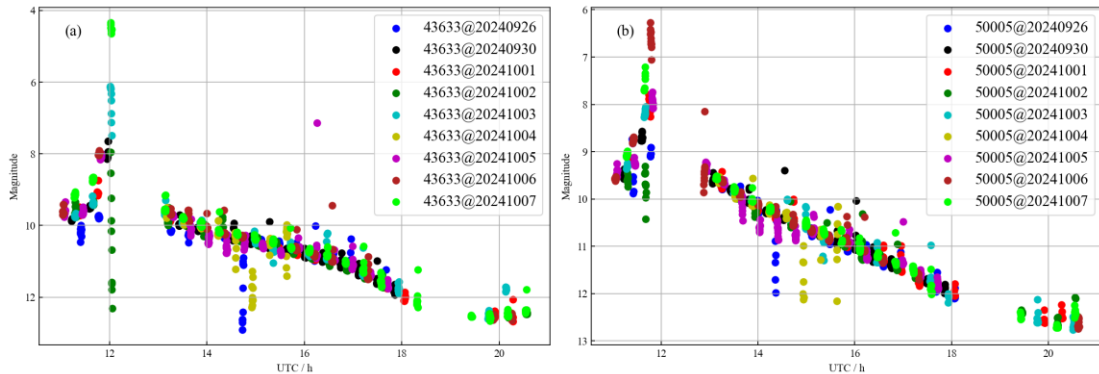


图 20 卫星 00001 附近卫星 43633 和 50005 闪光期间的光度曲线

Fig.20 Light curve of satellite 43633 and 50005 near satellite 00001 during glints

为清晰查看卫星的亮度峰值，表 7 统计了卫星 43633 和 50005 闪光期间的光度变化。其中，10 月 3 日在 UT 12:00 左右的亮度为 6.2 mag，UT 11:40 的亮度为 9.3 mag，在 20 min 内亮度亮了约 3.1 mag，UT 12:09 后进入地影；在 10 月 7 日 UT 12:01 左右的亮度为 4.5 mag，UT 11:40 的亮度为 8.7 mag，在 20 min 内亮度亮了约 4.2 mag，同样在 12:09 后进入地影。即卫星 43633 在进入地影前的 20 min 内亮度变化了 3~4 mag。卫星 50005 在 10 月 6 日亮度变化较大，该目标约在 UT 11:48 进入地影，在 UT 11:46 亮度最亮，约 6.2 mag，在 UT 11:25 的亮度约为 8.7 mag，在 20 min 内亮度亮了约 2.5 mag；在 10 月 7 日 UT 11:40 时亮度最亮，约 7.2 mag，在 UT 11:17 的亮度约为 9.0 mag，在 20 min 内亮度亮了约 1.8 mag。总之，在闪光期间，卫星 43633 的亮度变化的幅度约为 3.0~4.0 mag，卫星 50005 的亮度变化幅度约为 1.8~2.5 mag。

表 7 卫星 43633 和 50005 闪光期间光度变化

Table 7 Variations of magnitude of satellite 43633 and 50005 during glints

卫星 NORAD 编号	观测日期	最亮时刻前 20min 亮度 /mag@UTC	最亮时刻亮度/mag @UTC	进入地影时 刻/UTC	亮度变化幅 度/mag
43633	20241003	9.3 mag@11:40	6.2 mag@12:00	12:09	3.1 mag
	20241007	8.7 mag@11:40	4.5 mag@12:01	12:09	4.2 mag
50001	20241006	8.7 mag@11:25	6.2 mag@11:46	11:48	2.5 mag
	20241007	9.0 mag@11:17	7.2 mag@11:40	11:48	1.8 mag

在卫星 00002 邻近的目标中，卫星 35696 和 41021 有类似的星等变化，在某个时刻出现明显的亮度超出，但亮度超出的幅度没有卫星 00002 大。图 21 分别示出了闪光期间两颗卫星的光度曲线。

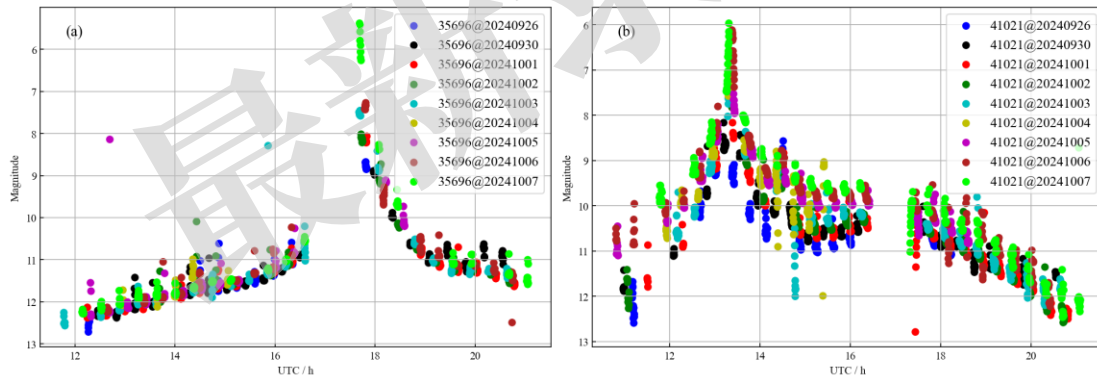


图 21 卫星 00002 附近卫星 35696 和 41021 在闪光期间的光度曲线

Fig.21 Light curve of satellite 35696 and 41021 near satellite 00002 during glints

表 8 进一步统计了卫星 35696 和 41021 闪光期间的光度变化。可见，卫星 35696 在 10 月 3 日 UT 17:40 左右(刚出地影时)亮度最亮达到 7.5 mag，在 UT 16:36(进入地影前)亮度为 11.0 mag，进地影前后亮度变化了 3.5 mag；10 月 7 日的亮度变化更大，UT 17:41 左右亮度最亮，约为 5.3 mag，UT 16:35 左右亮度约为 10.5 mag，进地影前后亮度变化了 5.2 mag。而卫星 41021 在 10 月 2 日、10 月 3 日、10 月 4 日和 10 月 6 日、10 月 7 日的亮度变化均较大，值得关注的是，该卫星不是在进入地影前后亮度最亮，而是在 UT 13:00 时(此时相位角约 60°)亮度最亮。统计该卫星在观测期间的闪光亮度。10 月 2 日 UT 13:19 时亮度最亮约 7.2 mag，约 20 min 后 UT 13:41 亮度约 9.0 mag，亮度变化了 1.8 mag；10 月 3 日 UT 12:55 亮度约 9.0 mag，UT 13:16 时亮度最亮约 7.4 mag，UT 13:38 亮度约 8.8 mag，在亮度最亮前后约 20 min 内亮度变化了 1.6 mag 和 1.4 mag；10 月 4 日 UT 12:58 亮度约 8.8 mag，UT 13:20 亮度最亮时约 6.3 mag，UT 13:38 时亮度约 8.5 mag，在亮度最亮前后约 20 min 内亮度变化了 2.5 mag 和 2.2 mag；10 月 6 日 UT 13:01 亮度约 8.3 mag，UT 13:22 时亮度最亮约 6.1 mag，UT 13:44 亮度约 8.5 mag，在亮度最亮前后约 20 min 内亮度变化了 2.2 mag 和

2.4 mag; 10月7日 UT 12:55 亮度约 8.3mag, UT 13:18 时亮度最亮约 6.0 mag, UT 13:15 亮度约 7.5 mag, UT 13:37 亮度约 8.0 mag, 在亮度最亮的一轮观测中, 3 min 亮度变亮了 1.5 mag, 而在亮度最亮前后 20 min 内亮度变亮了约 2.5 mag 和 2.0 mag。总之, 闪光期间, 卫星 35696 亮度变化的幅度约为 3.5 ~5.2 mag, 卫星 41021 的亮度变化幅度约为 1.6~2.5 mag。

表 8 卫星 35696 和 41021 闪光期间光度变化

Table 8 Variations of magnitude of satellite 35696 and 41021 during glints						
卫星 NORAD 编号	观测日期	最亮时刻前 20min 亮度 /mag@UTC	最亮时刻亮度 /mag@UTC	进入地影 时刻/UTC	最亮时刻后 20min 亮度 /mag@UTC	亮度变化 幅度/mag
35696	20241003	11.0	7.5	16:36	-	3.5 mag
		mag@16:36	mag@17:40			
	20241007	10.5	5.3	16:35	-	5.2 mag
		mag@16:35	mag@17:41			
41021	20241002	-	7.2 mag@13:19	16:18	9.0 mag@13:41	1.8 mag
	20241003	9.0 mag@12:55	7.4 mag@13:16	16:15	8.8 mag@13:38	1.4-1.6 mag
	20241004	8.8 mag@12:58	6.3 mag@13:20	-	8.5 mag@13:38	2.2-2.5 mag
	20241006	8.3 mag@13:01	6.1 mag@13:22	16:22	8.5 mag@13:44	2.2-2.4 mag
	20241007	8.5 mag@12:55	7.5 mag@13:15	16:14	8.0 mag@13:37	2.0-2.5 mag
			6.0 mag@13:18			

综上所述, 与北斗 GEO 卫星的光度曲线比较, 发现北斗 GEO 卫星亮度增加仅为 2.5 mag, 而卫星 00001 和 00002 在闪光期间的亮度增加达到 5~6 mag, 卫星 00001 和 00002 呈现更大幅度的亮度增加, 且亮度变化更快更集中; 邻近其他目标的光度曲线显示, 闪光期间大多数 GEO 目标的亮度增加约为 2.0~5.0 mag。由此可以得出, 闪光期间卫星 00001 和 00002 的亮度增加较其他卫星幅度更大, 这进一步说明了其发生镜面反射的太阳能帆板更大。

7 结论

GEO 卫星的闪光现象是光度变化的一个重要特征, 对卫星光学特性研究和运动状态分析具有重要的实际意义。通过秋分后闪光季节蒙东站观测到的两颗 GEO 卫星的光度变化分析发现, 卫星的闪光现象与太阳赤纬角有关, 当卫星的赤纬角与太阳赤纬角接近时, 在地影之外的小相位角处可以观测到显著的 GEO 卫星闪光现象, 闪光主要来源于超大太阳能帆板的镜面反射。根据闪光现象估计了太阳能帆板的尺寸和 offset, 发现了卫星可能的太阳能帆板指向变化。进一步比较了闪光和定位前后的光度差异, 发现卫星光度曲线变化趋势的一致性。最后分析了闪光期间其他卫星的闪光现象, 发现不同卫星的闪光强度存在差异, 但均在闪光期间光度变化更快更集中。

后续将持续关注闪光期间 GEO 卫星亮度的变化, 并根据目标的结构和散射特性进行仿真, 分析目标光度的异常变化。GEO 卫星闪光期间的光度分析, 不仅可为卫星的光度观测创造有利条件, 还可为目标的特性分析提供特征数据, 进一步为目标的运动和工作状态分析提供依据, 应用于高轨目标的态势分析。

参考文献

- [1] HALL D. Optical cubesat discrimination[C]// Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Kihei: Maui Economic Development, 2008. Retrieved from <https://www.amostech.com/TechnicalPapers/2008/NROC/Hall.pdf>
- [2] VRBA F J, DIVITTORIO M E, HINDSLEY R B, *et al.* A survey of geosynchronous satellite glints[C]//Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Wailea: The Maui Economic Development Board, 2009, E28
- [3] PAYNE T E, GREGORY S A, LUU K. SSA analysis of GEOS photometric signature classifications and solar panel offsets[C]//Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Wailea: The Maui Economic Development Board, 2006: E73
- [4] XU Can, ZHANG Yasheng, ZHANG Feng, *et al.* Seasonal glint phenomenon of the solar arrays of three-axis stabilization GEO satellite[J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, **38**(5): 0529001 (徐灿, 张雅声, 张峰, 等. 三轴稳定地球同步轨道卫星帆板季节性闪光现象研究[J]. *光学学报*, 2018, **38**(5): 0529001)
- [5] DUNSMORE A N, KEY J A, TUCKER R M, *et al.* Spectral measurements of geosynchronous satellites during glint season[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 2017, **54**(2): 349-355. DOI: 10.2514/1.A33583
- [6] JOLLEY A. Analysis of specular reflections off geostationary satellites[C]//Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Wailea: The Maui Economic Development Board, 2016
- [7] WEISZ D E, CHUN F K. Comparison of geosynchronous satellites spectral signatures during glint season[C]//Proceedings of the Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Wailea: The Maui Economic Development Board, 2017
- [8] DEMEULENAERE A J, HARMON E Q, CHUN F K. Simultaneous glint spectral signatures of geosynchronous satellites from multiple telescope[C]//Proceedings of 2018 Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Wailea, 2018. Retrieved from <https://amostech.com/TechnicalPapers/2018/Poster/DeMeulenaere.pdf>
- [9] WANG Y, DU X P, ZHAO J G, *et al.* What causes the abrupt changes in the light curve of a GEO satellite?[J]. *Acta Astronautica*, 2018, **153**: 130-137
- [10] MASTERS A W, WILSON M K A, CHUN F K, *et al.* Analysis of photometric signatures of DTV-10 collected 8 years apart[C]//Proceedings of 2022 Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Wailea, 2022. Retrieved from <https://amostech.com/TechnicalPapers/2022/Poster/Masters.pdf>
- [11] WANG Yang, DU Xiaoping, FAN Chunlin. Progress of light curve inversion technology for resident space object characteristics[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, **62**(15): 1578-1590 (王阳, 杜小平, 范椿林. 地基光度曲线反演空间目标特征技术研究进展[J]. *科学通报*, 2017, **62**(15): 1578-1590)
- [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. Wailea: The Maui Economic Development Board, 2013, E34
- [13] HINDSLEY R, ARMSTRONG J T, SCHMITT H, *et al.* Small glints as an aid for imaging geosats using an optical Michelson interferometer[J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2013, **7**(1): 073549. DOI: 10.1117/1.JRS.7.073549
- [14] WIERSEMA K, CHOTE P, MARCHANT J, *et al.* Short timescale imaging polarimetry of geostationary satellite Thor-6: The nature of micro-glints[J]. *Advances in Space Research*, 2022, **70**(10): 3003-3015
- [15] ZHUANG Cheng. The research of photometric calibration of geosynchronous orbit (GEO) space debris under solar declination[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2011 (庄诚. 基于太阳赤纬角的地球同步轨道(GEO)空间碎片光度测量标定方法的研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2011)
- [16] ZHAO X F, YU Y, MAO Y D, *et al.* Long-term photometric signature study of two GEO satellites[J]. *Advances in Space Research*, 2021, **67**(8): 2241-2251
- [17] ZHAO Xiaofen, ZHENG Jinghui, MAO Yindun, *et al.* GEOS photometric signature classifications based on observations of FocusGEO telescopes[J]. *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(1): 136-143 (赵晓芬, 郑景辉, 毛银盾, 等.

作者简介:



赵晓芬（第一作者） 女, 1986年10月出生, 博士, 现为中国科学院上海天文台副研究员, 主要研究方向为空间目标光学特性分析与应用。E-mail: zhaoxiaofen@shao.ac.cn



毛银盾（通讯作者） 男, 1979年5月出生, 博士, 现为中国科学院上海天文台正高级工程师, 研究方向为天体测量应用。长期从事空间目标监视光学设备研制、观测及数据处理, 空间事件分析及目标特性研究。E-mail: dundun@shao.ac.cn