0254-6124/2022/42(1)-0136-08 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

ZHAO Xiaofen, ZHENG Jinghui, MAO Yindun, YU Yong, WANG Kunpeng, WEN Changli. GEOS Photometric Signature Classifications Based on Observations of FocusGEO Telescopes (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2022, **42**(1): 136–143. DOI:10.11728/cjss2022.01.200928086

FocusGEO 望远镜观测地球同步轨道目标的光度特性分类*

赵晓芬[1,2] 郑景辉[1,3] 毛银盾[1]
于 涌[1] 王鲲鹏[4] 温昌礼[5]

1(中国科学院上海天文台 上海 200030)

2(中国科学院大学 北京 100049)

3(上海大学理学院 上海 200444)

4(北京跟踪与通信技术研究所 北京 100094)

5(中国人民解放军 32035 部队 西安 710200)

摘 要 基于 FocusGEO 望远镜 2017 年 12 月至 2019 年 6 月的测光观测数据，开展台站上空地球同步轨道（GEO）目标光度曲线的分类研究。通过对 GEO 卫星光度曲线特征的统计分析，建立了一种全新的 GEO 卫星分类系统，确定了各类 GEO 卫星光度曲线的占比，分析了光度特征类别与卫星平台的相关性。本研究将 197 颗 GEO 卫星的光度曲线分为六类，其中约 90% 的卫星可归为三类：典型类、BSS 类和 Ekspress 类。光度特征分类与卫星平台无直接的相关性，但同一类别中平台相同或相近的卫星，具有相似的光度曲线。该分类系统可为位置相近的多个 GEO 目标的准确识别提供辅助手段，为目标异常监测和物理特性研究提供依据，对空间态势感知具有重要意义。

关键词 GEO 目标，光度特征，分类研究，卫星平台

中图分类号 P171.3

GEOS Photometric Signature Classifications Based on Observations of FocusGEO Telescopes

ZHAO Xiaofen[1,2] ZHENG Jinghui[1,3] MAO Yindun[1] YU Yong[1]

WANG Kunpeng[4] WEN Changli[5]

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

2(*University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049)

* 国家自然科学基金项目资助（11803067）

2020-09-28 收到原稿，2021-05-26 收到修定稿

E-mail：dundun@shao.ac.cn

3(*Shanghai University, College of Sciences, Shanghai* 200444)

4(*Beijing Institute of Tracking and Telecommunication Technology, Beijing* 100094)

5(*32035 Troops of PLA, Xi'an* 710200)

Abstract Ground-based optical-electrical observation is the main approach to obtain the Geostationary Earth Orbit (GEO) targets' optical characteristics. Light curve classification was studied based on the photometry observations of FocusGEO telescope at Lijiang Station from December 2017 to June 2019. A new classification system was introduced based on the statistical analysis of GEO satellite light curve features. Moreover, the correlation between light curve classification and satellites' bus type was analyzed. Results show that photometric signatures of 197 GEO satellites can be classified into six classes and each class can be qualitatively explained by the actual satellite structure. Approximately 90% of these satellites appear to belong to three of six different classes. However, light curve classification has no significant correlation to satellites' bus types, but for the satellites with the same or similar bus types in each class, the light curves resemble each other. The classification system can aid to identify cluster GEO targets and provide the basis for anomaly detection and physical characteristics research, which is of great significance for space situational awareness.

Key words GEO targets, Photometric signature, Classification system, Bus type

0 引言

地球同步轨道(Geosynchronous Earth Orbit, GEO)卫星因其对地覆盖面广,可全天时对地面实施侦察、通信,具有重要的价值和用途。根据美国战略司令部(USSTRATCOM)发布的数据[1],目前在轨GEO目标(包括卫星、碎片和火箭体)约1200余颗,每年新发射的GEO卫星约30颗。GEO目标分布较为密集,赤道带上平均GEO目标密度为每平方度3颗,密集区域甚至达到每平方度5颗。另外,GEO目标运动形式多样,包括在轨运行、轨控机动、退役失效、离轨漂移等[2]。因此,针对GEO卫星监测的相关研究近年来逐渐成为空间态势感知领域的研究热点。

GEO卫星距离地球表面约36000 km,深空雷达虽然可以探测到GEO目标,但是受到作用距离的限制,运行成本较高,地面光学仍是主要手段之一。基于时间序列的测光观测是GEO目标观测中最常用的一种方法。该方法不仅能够估算目标的尺寸和亮度,用于空间目标的识别,还能够监测卫星在轨的健康状态。 此外,该方法还能够估计卫星上太阳能帆板的指向角,并实现GEO卫星光度特征分类。但目前对GEO卫星光度特性分类的研究成果较少。Payne等[3]在2006年开展了GEO卫星光度曲线特征分类研究和太阳能帆板offset估计,将80%的卫星归为典型类和A2100类两类。Jolley等[4]在2015年将GEO卫星Galaxy 11 (卫星编号: 26038, BSS702 C平台)的光度曲线归为Peculiar类,而不是BSS702 C类,并对光度特性分类和平台类型的相关性提出质疑。国内目前对GEO卫星光度特性分类的相关研究较少。Wang等[5]利用文献[3]的研究结果,对将光度曲线应用于卫星平台反演进行了分析。因此,开展GEO卫星光度特性分类和平台的相关性研究能够很好地解释光度曲线的不同变化。

鉴于GEO目标应用广泛、数量众多、密度高、距离远的特点,上海天文台研究团队在2017年年底研制完成了具有超大视场的GEO目标专用观测设备FocusGEO望远镜。基于探测星等和探测目标完备性的考虑,将该望远镜放置在云南天文台丽江观测站。该望远镜可在15 min内对台站上空约3200平方度的地球同步轨道带完成全覆盖式的扫描观测,对台站上空的GEO目标进行准实时监测。本文利用2017年12月至2019年6月的测光数据,通过对大量GEO目标的光度曲线分析,建立了一种新的基于光度特征的分类系统,将近200个GEO卫星的光度

特征归纳为六类，确定了每一类光度曲线的占比，并分析了卫星平台类型和曲线分类的相关性。该分类系统可对台站上空 GEO 卫星的光度曲线特征分布有直观定量的解释，为光度特性的应用研究提供参考。

1 FocusGEO 望远镜及目标观测

上海天文台研制的 FocusGEO 望远镜是一套地球同步轨道动态监视光学系统，采用单机架并置三镜筒的结构。如图 1 所示[6]，望远镜采用定制的超大视场折射式光学镜筒，口径为 180 mm，焦距为 220 mm。CCD(Charge Coupled Device)相机采用 bin2 模式，像素阵列为 1528 pixel×1528 pixel，单个像素的物理尺寸为 24 μm，对应的空间比例尺为 22.4″·pixel^{-1}，单个镜筒的视场为 9.5°×9.5°。在曝光 5 s 的情况下，该望远镜可探测暗至 15 星等的 GEO 目标，观测精度在方位和俯仰方向优于 3″ [6]。

FocusGEO 望远镜采用循环扫描观测模式，观测模式简单可靠，具有极高的观测效能，所得到的高精度准实时观测数据，可弥补双行轨道根数(TLE)在预报精度和时效性上的不足。该望远镜为特殊设计的短焦距超大视场望远镜，且视场中星象十分密集，如图 2 所示[6]，研制单位开发了专用的望远镜自动观测、资料实时处理、数据传输与管理软件系统[7]，完成 GEO 目标的识别、天文定位和测光。

据统计 2017 年 12 月至 2019 年 6 月，FocusGEO 望远镜在云南天文台丽江观测站共观测 313 天，观测目标 1266 个，其中 GEO 目标 881 个，其余为大椭圆目标和地球同步轨道转移轨道目标。GEO 目标中除了 253 个火箭残骸和碎片之外，卫星目标 628 颗，占 71.3%，其中工作卫星 197 颗，占 31.4%，其余均为失效卫星。本文仅对正常工作的 197 颗 GEO 卫星的光度曲线特征进行分析，实现曲线分类。

2 GEO 目标光度特征分类

光度曲线反映了卫星亮度随时间或相位角的变化，亮度一般以星等(magnitude)为单位，星等值越小表示亮度越亮。不同形状和类型的卫星光度曲线有所差异。由于 FocusGEO 采用循环扫描的观测模式，每个目标每晚的观测多则 40 个点(约 15 min 扫描一轮)，少则不多于 10 个点，单独一晚的观测曲线无法完整表征目标的光度特征，故采用连续多晚的光度曲线叠加得到完整的光度曲线。因为同一个目标连续多天的光度曲线具有明显的重复性[8]，故叠加得到的光度曲线是可靠的。因此，本文对这 197 颗 GEO 卫星的叠加光度曲线进行分析，通过统计特征建立目标光度特征分类系统，实现卫星光度特征的分类。

2.1 分类结果

本文将这 197 颗 GEO 卫星的光度特征分为六类，结果列于表 1。表 1 中，约 50.25% 的卫星属于典型类，3.05% 的目标属于第二典型类，16.75% 的目标为 BSS 类，6.09%的目标为 A2100 类，20.81% 的目标为 Ekspress 类，其他均为特殊类。可见，约 90% 的卫星可归为三类：典型类、BSS 类和 Ekspress 类。下面分别给出每一类光度特征的目标示例。

图 3 所示为第一类曲线的显著特征，在 0°相位角附近亮度最亮。卫星 26559、39727、41380 等的光度曲线均为典型类。由于不同季节的太阳赤纬角不同，导致卫星的光度曲线存在不同程度的偏移[9]，因此需要修正太阳赤纬角的影响[10]，采用修正角(Equatorial Phase Angle)代替相位角(Phase Angle)作为横坐标，

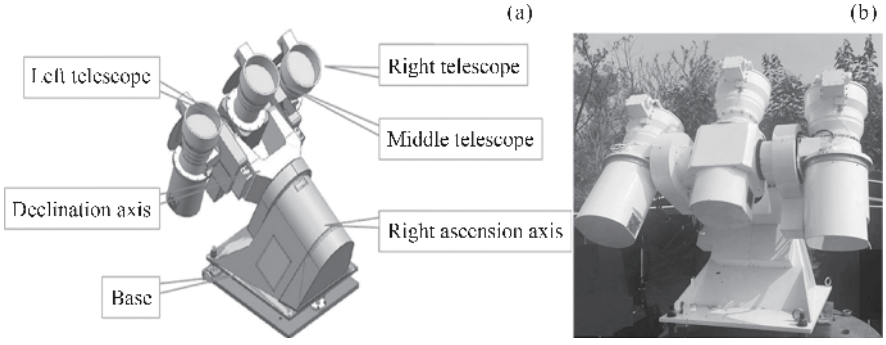


图 1 FocusGEO 望远镜三维结构 (a) 及 FocusGEO 望远镜实物 (b)

Fig. 1 3 D Structure of FocusGEO (a) and physical picture of the equipment (b)

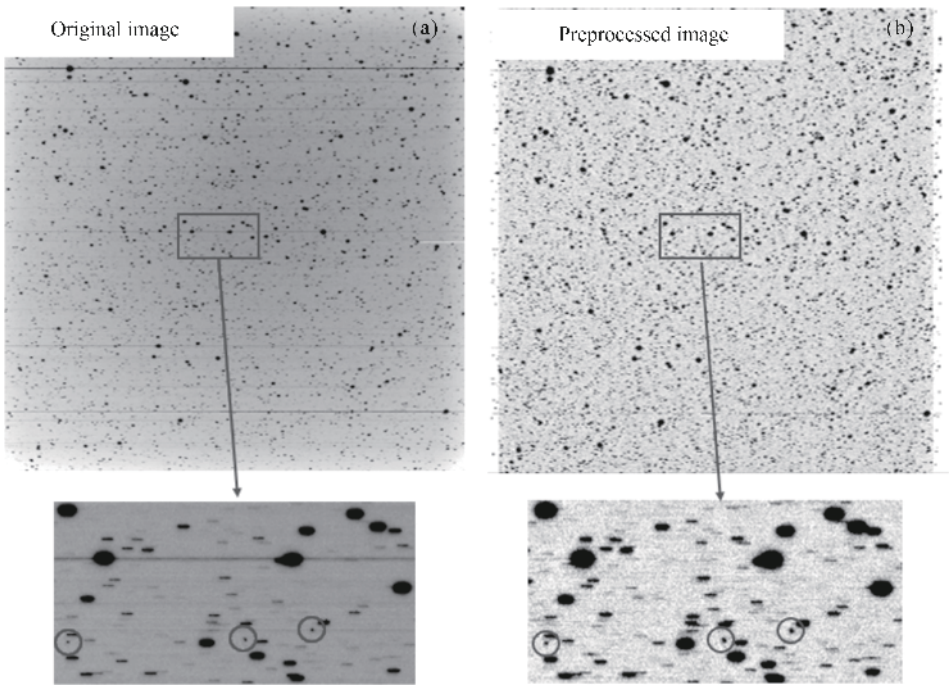


图 2 FocusGEO 观测原始图像 (a) 及预处理图像示例 (b)。局部放大图圆圈标识为 GEO 目标

Fig. 2 Example of a FocusGEO observation original image(a) and example of preprocessed image(b). Circle denotes the GEO targets

表 1 光度特征分类结果

Table 1 Results of classification of photometric signatures

类别	分类	特点	数量	比例/(%)
第一类	典型类	仅在0°有亮度峰值, 两边近似对称且单调下降	99	50.25
第二类	第二典型类	曲线不关于0°对称, 在20°～40°之间有亮度峰值, 两边单调下降	6	3.05
第三类	BSS类	曲线对称, 在第一类的基础上, 在±40°或60°有极大值	33	16.75
第四类	A2100类	曲线对称, 在0°有极小值, ±40°有极大值, 呈M形	12	6.09
第五类	Ekspress类	曲线不对称, 在第一类的基础上, 在100°或–100°有极小值	41	20.81
第六类	特殊类	曲线不对称, 呈不规律变化	6	3.05

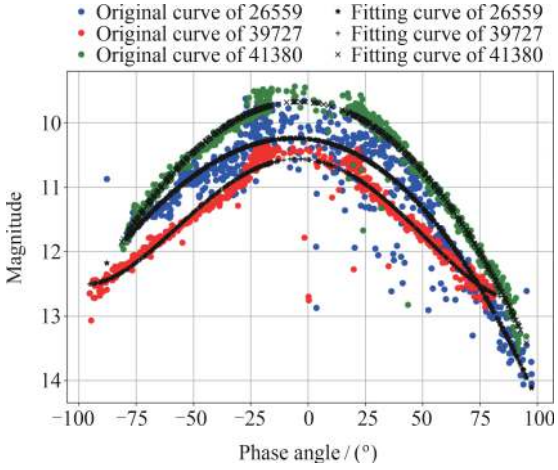


图 3 第一类曲线特征示例 (卫星 26559、39727、41380 的相位角序列光度曲线)。拟合曲线采用多项式拟合

Fig. 3 Examples of Class 1 photometric signatures (Light curves of satellites 26559, 39727 and 41380). The black curves are fitted using the polynominal fitting method. The sparse data near zero phase angle are due to the variation of solar declination angle

得到修正后的光度曲线(见图 4)。该类光度特征的卫星多为对称结构, 天线均匀分布于本体两侧。

图 5 所示为第二类光度曲线。卫星 29045、29272、35755 等的光度曲线均为此类。该类曲线的典型特征是将亮度峰值后移到修正角更大值处。而这类卫星多为日本卫星, 卫星的天线在本体两侧的分布不对称。

图 6 所示为第三类光度曲线。卫星 27399、28911、29163 等的光度曲线均为此类。该类曲线的典型特征是除在相位角 0°有亮度峰值外, 在左右两侧相位角较

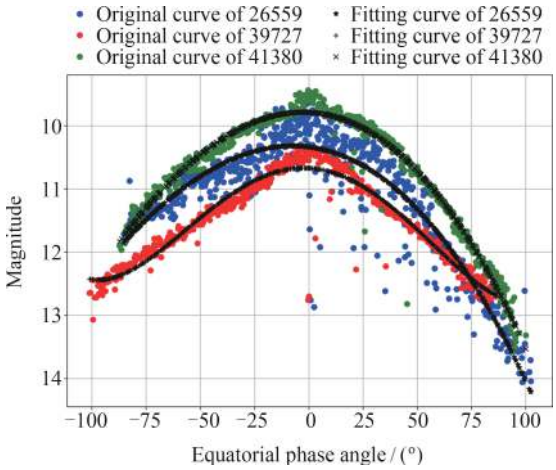


图 4 第一类曲线特征示例（卫星 26559、39727、41380 的修正角序列光度曲线）。拟合曲线采用多项式拟合

Fig. 4 Examples of Class 1 photometric signatures (Magnitude variation with equatorial phase angle light curves of satellites 26559, 39727 and 41380). The black curves are fitted using the polynominal fitting method

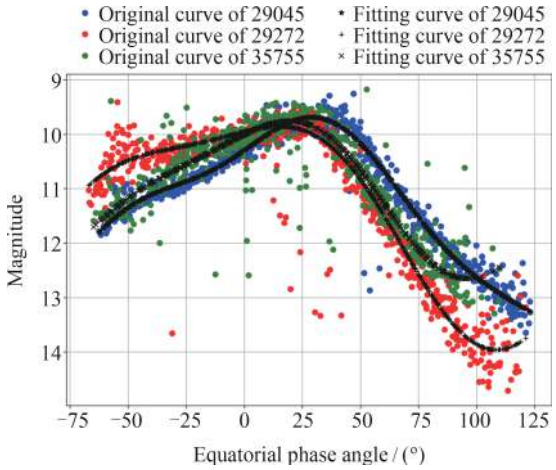


图 5 第二类曲线特征示例（卫星 29045、29272、35755 的修正角序列光度曲线）。拟合曲线采用多项式拟合

Fig. 5 Examples of Class 2 photometric signatures (Modified light curves of satellites 29045, 29272 and 35755). The black curves are fitted using the polynominal fitting method

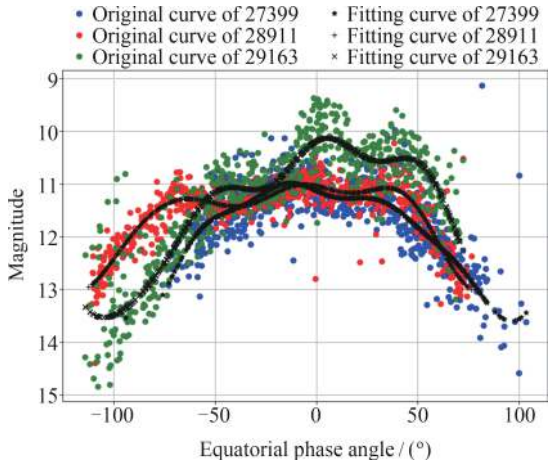


图 6 第三类曲线特征示例（卫星 27399、28911、29163 的修正角序列光度曲线）。拟合曲线采用 Fourier 方法拟合

Fig. 6 Examples of Class 3 photometric signatures (Magnitude variation with equatorial phase angle light curves of satellites 27399, 28911 and 29163). The black curves are fitted using the Fourier fitting method

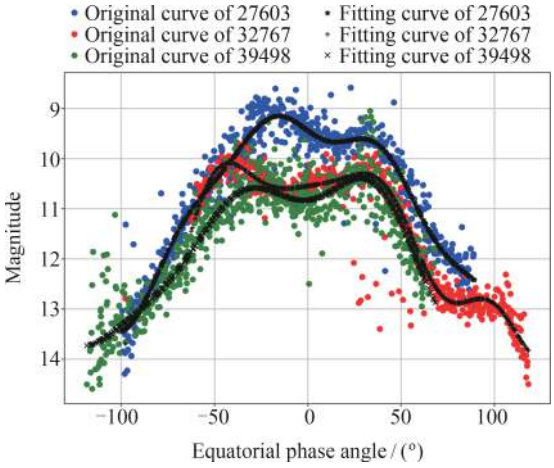


图 7 第四类曲线特征示例（卫星 27603、32767、39498 的修正角序列光度曲线）。拟合曲线采用 Fourier 方法拟合

Fig. 7 Examples of Class 4 photometric signatures (Magnitude variation with equatorial phase angle light curves of satellites 27603, 32767 and 39498). The black curves are fitted using the Fourier fitting method

大处存在亮度极大值。而这类卫星多为对称结构，除本体两侧的大天线外，在本体对地的面元上也分布着数个小型天线。

图 7 所示为第四类光度曲线。卫星 27603、32767、39498 等的光度曲线均为此类。该类曲线的典型特征是在相位角 0°有亮度极小值，在左右两侧相位角较大处存在亮度极大值。而这类卫星的天线在本体两侧的分布不均匀或本体两侧的天线形状不同。

图 8 所示为第五类光度曲线。卫星 28628、36032、37393 等的光度曲线均为此类。该类曲线的典型特征

是在第一类的基础上, 在 100°或者–100°左右存在亮度极小值。而这类卫星的本体或者天线结构多为不对称分布。虽与第一类曲线特征有些相似, 但二者在±100°有明显差异。该类曲线的不对称性也可能是因为台站的位置导致观测的相位角覆盖不全引起的, 需要进一步观测分析。

图 9 所示为第六类光度曲线。卫星 28154、29640、33463 等的光度曲线均为此类。该类曲线的典型特征是无明显的规律性变化。这类卫星的结构多样, 多为不规则形状。

2.2 结果比较

2006 年 Payne 等[3] 通过对位于美国本土及太平洋地区的 36 颗 GEO 卫星的光度特征分析, 建立了一种基于光度曲线特征的分类系统, 将卫星分为 5 类, 其中近 80% 的卫星为典型类和 A2100 类[3]。本文将 Payne 的光度特征分类方法应用于 FocusGEO 望远镜台站上空的 GEO 工作卫星, 将目标分为六类。表 2 给出了本文与 Payne 光度特征分类结果的比较。与 Payne 的结果比较发现, 二者分类结果相似, 大多数的目标为典型类。本文将约 80% 的卫星分为两类: 典型类和 BSS 类, 这与 Payne 分类结果稍有不同。此外, 相同类别的 GEO 目标占比不同, 例如典型类和 A2100 类。本文结果中 A2100 类目标较少, 仅占 6.09%, 而 Payne 的结果中 A2100 类目标占比约 30%, 这是由于分析的目标样本不同, 说明美国太平洋上空分布的 GEO 目标中该类卫星较多, 而中国台站上空该类卫星较少。此外, 本文还发现了两种不同的类别: 第二典型类和 Ekspress 类, 但未发现通信星类的目标。本文仅分析了中国丽江观测站上空的 GEO 卫星, 对于不可见目标无法实现分类。后续研究将考虑 GEO 目标的完备性, 实现目标的全覆盖, 完善分类结果。

3 特征分类与卫星平台的相关性

卫星的亮度不仅与卫星与测站的距离、太阳相位角有关, 还与卫星自身的形状、尺寸和平台有很大关系。本文对 FocusGEO 望远镜观测的 GEO 卫星平台(Bus Type)类型和光度曲线特征分类的相关性进行分析。据统计这 197 颗 GEO 卫星的平台[11] 共有 21 类, 详见表 3。

首先分析每一类中 GEO 卫星的光度曲线与平台类型的关系。第一类中三颗卫星 26559、23839 和 41380 的平台类型分别为 A2100、AS4000、BSS-702 HP, 为三种同属于美国的平台; 但卫星 39237、32779、39234 则分别为以色列的 AMOS、中国的 DFH-3 和印度的I-2 K Bus 平台。第二类中的三颗日

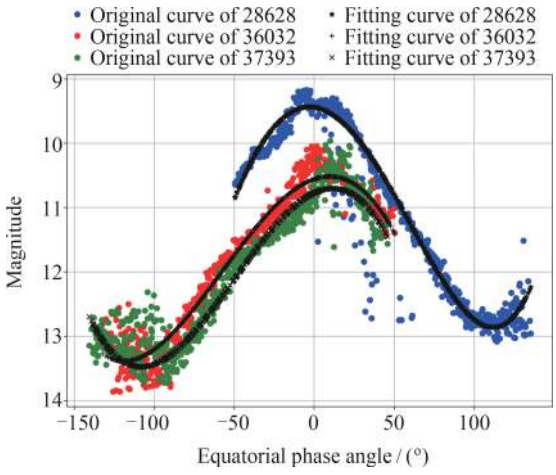


图 8 第五类曲线特征示例(卫星 28628、36032、37393 的修正角序列光度曲线)。拟合曲线采用多项式拟合

Fig. 8 Examples of Class 5 photometric signatures (Magnitude variation with equatorial phase angle light curves of satellites 28628, 36032 and 37393). The black curves are fitted using the polynominal fitting method

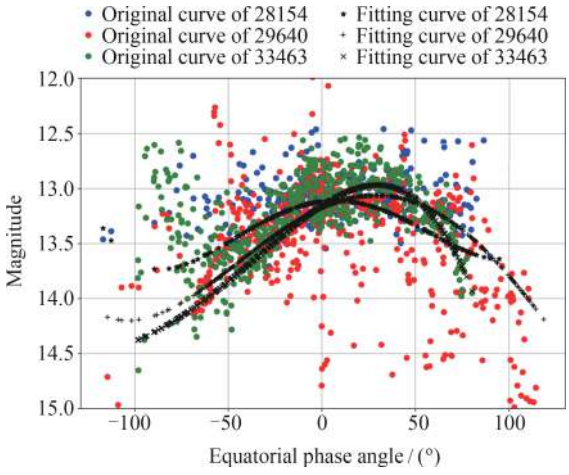


图 9 第六类曲线特征示例(卫星 28154、29640、33463 的修正角序列光度曲线)。拟合曲线采用多项式拟合

Fig. 9 Examples of Class 6 photometric signatures (Magnitude variation with equatorial phase angle light curves of satellites 28154, 29640 and 33463). The black curves are fitted using the polynominal fitting method

表 2 光度特征分类结果比较

Table 2 Comparisons of results of photometric signature classification

本文结果			文献[3]结果		
分类	特点	比例/(%)	分类	特点	比例/(%)
典型类	仅在0°相位角有亮度峰值,两边近似对称且单调下降	50.25	典型类	0°附近有峰值,两边呈对称、平滑单调形式	47.2
第二典型类	曲线不关于0°对称,在20°～40°之间有亮度峰值,两边单调下降	3.05	A2100类	0°附近有极小值,两边的光度曲线以不同的平滑方式增加;在±40°左右,曲线平滑衰减,多数曲线不完全对称	30.6
BSS类	曲线对称,在第一类的基础上,在±40°或60°有极大值	16.75	通信星类	在典型类基础上,±40°上有极小值	5.6
A2100类	曲线对称,在0°有极小值,±40°有极大值,呈M形	6.09	BSS702 C类	在典型类基础上,±60°上有极大值,极大值比通信星类更亮更宽	2.8
Ekspress类	曲线不对称,在第一类的基础上,在100°或–100°有极小值	20.81	特殊类	关于0°对称性弱,曲线变化不平稳	13.9
特殊类	曲线不对称,呈不规律变化	3.05	—	—	—

表 3 本文分类中涉及的 GEO 卫星平台类型统计结果

Table 3 Statistic results of bus types of GEO satellites related to our classification

No.	平台类型	所属国别	卫星编号	数目
1	A2100	USA	25894、26559、27603、27632、28154、29045、29272、32019、32767、35755、37207、37481、37776、38331、38332、40887、43162	17
2	AMOS	Israel	39237	1
3	AS-4000、7000	USA	23839、24957	2
4	HS-601、GEM、BSS-702	USA	24732、25071、25462, 25630、25657、26388、26451, 26638、26853、27399、27718、28117、29648、32404、34713、34941、38098、39476、41380、41588、41748、41879、42075、42698、42950	25
5	DFH-2、3、4	China	32779、36287、36590、37150、37234、37677、37804、38091、38352、38953、39157、40982、41021、41034、41103、41238、41586、41725、41838、41869、42662、42763、43450、43698、43920、44067、44076、44231	28
6	DS-2000	Japan	28937、33274、37606、40267、41836、42917	6
7	DSCS-3	USA	23628、26575	2
8	Ekspress-1000、2000	Russia	39487、39612、39613、39727、39728、40258、40277、40345、43432、43867	10
9	Eurostar-2000、3000	Europe	26107、28628、28899、30794、36744、37393、39020、39034、40147、43488	10
10	Star-1、2, GeoStar-2	USA	26720、27461、32388、35362、36106、37265、39460、39500、41552	9
11	I-1 K、2 K、3 K Bus	India	28911、30793、37605、37746、38779、39234、39498、40269、40332、40880、41028、41469、41752、41793、42695、42747、42815、43824、43864	19
12	Insat-2、3 bus	USA	39216	1
13	Milstar Bus	USA	26715	1
14	MSS-2500-GSO	Russia	27441、28134、28707、32478、36358、39375	6
15	Navigator-Bus	Russia	41105	1
16	SAST-5000	China	41882、41911	2
17	Spacebus-3000、4000	France	26369、28638、29163、29349、31800、33051、35812、35943、38107、39017、39022、40617、41944、42691、42984、43463	16
18	SSL-1300	USA	26590、26900、27513、28184、28364、28786、35696、36032、37238、37933、38740、39508、40141、40940、41591、41729、41747、41794、41903、42942、42951、43587、43611、44048	24
19	X-SAT Microsat	USA	44065	1
20	Yakhta.	Russia	37749	1
21	Null	Multination	20253、23613、28158、29640、32500、33463、38049、38070、40367、41121、41194、43491、43683、43823、43874	15

注 卫星编号来源于USSTRATCOM的目标编号,由5位阿拉伯数字组成;Null表示目标平台未知。

本卫星 29045、29272、35755 均为美国的 A2100 AXS 平台，但卫星 37150、38332、42747 则分别为中国的 DFH-4、美国的 A2100 X 和印度的 I-3 K Bus 平台。第三类中的卫星 25354、27399、29163 分别为美国的 A2100, BSS-601 和法国的 Spacebus-3000 A 平台，第四类中的卫星 27603, 39498, 41552 分别为美国的 A2100 AXS、印度的 I-2 K Bus 和美国的 GeoStar-2.3 Bus 平台，第五类中的卫星 28628、36032、37481 分别为欧洲的 Eurostar-3000 GM、美国的 SSL-1300 和 A2100 M 平台。因此，卫星的平台类型与光度曲线类别无明显的相关性。

但是对于每一类中相同国家同系列卫星，卫星平台则相同或相近。例如第一类中的三颗日本卫星 26559(NSAT 110)、32019(BSAT 3 A)、37207(BSAT 3 B)均为 A2100 A 平台；第二类中的三颗日本卫星 29045(JCSAT 9)、29272(JCSAT 10)、35755(JCSAT 12)均为 A2100 AXS 平台；第三类中的三颗印度卫星 37605(GSAT 8)、38779(GSAT 10)、41028(GSAT 15)均为 I-3 K Bus 平台；第四类中印度卫星 39498(GSAT 14)和 41793(GSAT 18)分别为 I-2 K Bus 和 I-3 K Bus 平台；第五类中的卫星 28628(INMARSAT 4-F1)和 28899(INMARSAT 4-F2)均为 Eurostar-3000 GM 平台。

4 结论

利用 FocusGEO 望远镜 2017 年 12 月至 2019 年 6 月的测光数据，将国外的光度特征分类方法推广至中国丽江观测站上空的 GEO 目标，将台站上空正常工作的 197 颗卫星的光度特征分为六类：典型类、第二典型类、BSS 类、A2100 类、Ekspress 类和特殊类。各类曲线均在特定相位角具有显著特征，且与卫星结构相关。该结果表明，中国台站上空 GEO 目标的光度特征具有多样性，且不同类 GEO 目标的光度特征存在显著差异。因此，可依据卫星的不同亮度变化实现同屏多目标的快速识别，也可将卫星的异常亮度变化与其结构相关联，在 GEO 目标的识别和监测方面具有重要意义和广泛应用。对特征分类与卫星平台的相关分析初步表明二者不存在明显的相关性，这一结论有待进一步分析。

此外，根据本文分类中发现的不同于国外分类的光度特征，表明两种分类系统均不完备，这主要归因于 GEO 目标覆盖的不完备性。后续计划将该研究扩展到整个同步轨道带，通过统计特征和聚类方法实现目标的全覆盖和完全分类，建立 GEO 目标的光度曲线数据库，并开展光度曲线反演空间目标物理特性的研究，进一步分析特征分类与卫星平台的相关性。

致谢 云南天文台丽江高美古观测站在观测期间提供了大力协助，上海天文台佘山站观测助手提供了观测工作。

参考文献

[1] Space-track. org. Full Catalog [OL]. [2020-05-20]. https://www.space-track.org/

[2] MAO Yindun, TANG Zhenghong, YU Yong, *et al*. Introduction and development of geosynchronous orbit dynamic monitoring optical system, [J]. *Progress in Astronomy*, 2018, **36**(1): 57-67

[3] PAYNE T, GREGORY S, LUU K. SSA analysis of GEOS photometric signature classifications and solar panel offsets[C]//Proceedings of the 7 th Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Hawaii: The Maui Economic Development Board, 2006

[4] JOLLEY A, BEDARD D, WADE G. Multicolour optical photometry of active geostationary satellites[C]//Proceedings of the 16 th Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Hawaii: The Maui Economic Development Board, 2015

[5] WANG Yang, DU Xiaoping, FAN Chunlin. Progress of light curve inversion technology for resident space object characteristics[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2017, **62**: 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**: 1578-1590)

[6] LUO Hao, MAO Yindun, YU Yong, *et al*. FocusGEO observations of space debris at Geosynchronous Earth orbit[J]. *Advances in Space Research*, 2019, **64**(2019): 465-474

[7] WANG Wei, MAO Yindun, CHEN Guoping, *et al*. Design and implementation of software system of FocusGEO[J]. *Astronomical Research and Technology*, 2018, **15**(2): 225-231 (王维, 毛银盾, 陈国平, 等. FocusGEO软件系统的设计与实现[J]. 天文研究与技术, 2018, **15**(2): 225-231)

[8] ZHAO Xiaofen, YU Yong, MAO Yindun. Measurement and experimental study of geostationary orbit satellite OCS[J]. *Space Debris Research*, 2017, **2**: 8-16

[9] ZHUANG Cheng, SUI Chenghua, TANG Yijun. Research of photometric calibration of Geosynchronous-orbit GEO) space debris[J]. *Astronomical Research and Technology*, 2011, **8**(4): 343-346 (庄诚, 隋成华, 唐轶峻. GEO空间碎片光度测量标定方法的研究[J]. 天文研究与技术, 2011, **8**(4): 343-346)

[10] ZHAO Xiaofen, YU Yong, MAO Yindun, *et al*. Long-term photometric signature study of two GEO satellites[J]. *Advances in Space Research*, 2021, **67**(2021): 2241-2251

[11] Gunter's space page. S/C Platforms[DB/OL]. [2020-05-20]. https://space.skyrocket.de

(**责任编辑**: 孙伟英)