

文章编号: 0253-2239(2010)03-0763-05

利用光照反射模型分析中高轨人造卫星测光特性

唐轶峻^{1,2,3} 姜晓军¹ 卢晓猛¹ 魏建彦¹ 胡景耀¹

(¹ 中国科学院国家天文台, 北京 100012; ² 浙江工业大学理学院, 浙江 杭州 310032)

³ 中国科学院研究生院, 北京 100049

摘要 利用光照反射模型分析中高轨人造卫星测光特性,以不同形状特性、姿态稳定方式和技术状态的中高轨人造卫星为研究样本,进行可见光波段的时间序列测光观测,并给出了卫星视星等斜距改正和相位角计算的方法。首先,利用球状卫星测光特性实验数据验证了其镜面反射和漫反射光变特性理论模型计算结果,并进一步探讨了复杂形状卫星的光变特征。其次,分别对类柱状受控卫星和失控卫星的理论模型计算结果和实验观测数据进行对比分析。实验结果表明,卫星光变曲线与卫星物理特性,如生存状态、形状特性、姿态稳定方式等相关,可为分析卫星的技术状态及其历史演化过程提供判定依据。

关键词 光学测量;测光特性;中高轨;人造卫星;光反射模型

中图分类号 V557⁺.4 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103003.0763

Analysis of Photometric Characteristics of Medium and High Apogee Satellites Based on Light-Reflection Model

Tang Yijun^{1,2,3} Jiang Xiaojun¹ Lu Xiaomeng¹ Wei Jianyan¹ Hu Jingyao¹

(¹ National Astronomical Observations, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100012, China
² College of Science, Zhejiang University of Technology, Hangzhou, Zhejiang 310032, China
³ Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract To analyze the photometric characteristics of medium and high apogee satellites based on light reflection model, visual band time series photometry of satellites are employed for studying their physical properties. A sample of satellites in different shape, technical status and stabilization is composed. The accurate time series observations and distance correction method, phase angle calculation method are presented. First, mirror-reflection and diffuse of sunlight on spherical bodies and more complicated shapes are observed and analyzed. Then, experimental results showed that time series photometric light curve can reveal satellite's physical characteristics, such as shape, stabilization and health status. It can provide the criteria to determine the technical status and the evolvement of satellite.

Key words optical measurement; photometric characteristics; medium and high apogee; satellite; light-reflection model

1 引 言

中高轨人造卫星,距离地球表面约 20000 ~ 36000 km,由于雷达的探测信号与距离 r^{-4} 成正比,要受到地面杂波和大气损耗的影响,以及自身功率

和工作波长的限制,地基雷达一般用于低地球轨道上的人造卫星的测量,很难实现对中高轨卫星的探测。同时利用高分辨成像观测中高轨卫星由于衍射极限和大气影响尚有困难,因此基于非高分辨成像

收稿日期: 2009-01-08; 收到修改稿日期: 2009-05-16

基金项目: 国家 863 计划资助课题。

作者简介: 唐轶峻(1970—),男,博士研究生,副教授,主要从事天文数据处理与分析等方面的研究。

E-mail: tyj1970@163.com

导师简介: 魏建彦(1964—),男,博士,研究员,主要从事天体物理方面的研究。E-mail: wjy@bao.ac.cn

的光学观测是中高轨人造卫星探测的主要手段^[1]。对这类卫星的探测、测量是近年来中高轨人造卫星物理特性研究领域备受关注热点方向。由于在该领域的研究存在广泛的应用价值,已激发了科研工作者的浓厚兴趣,尤其美国、俄罗斯已经开展了大量的相关项目研究^[2,3]。例如美国的麻省理工学院主持的重大项目“地基光电深空空间监视系统”(GEODSS)和“天基可视计划”(SBV)主要研究空间碎片的探测、跟踪、识别。

基于时间序列的测光观测方法是中高轨人造卫星光学观测中最常用的一种方法,利用基于时序测光的非成像光学测光观测可以很容易区分碎片(死卫星)和存活卫星。文献[2~10]对高轨卫星的光度特性进行了研究,利用 CCD 测光来得到卫星的光变特征,从而对人造卫星的物理特性进行分析、识别。

2 相位角计算

在地基光电观测中,太阳、卫星和观测系统三者之间存在着相对运动。光学观测系统在跟踪观测过程中,接收到的卫星辐亮度值则是不断变化的,由于人造卫星自身并不发光的,而是通过反射太阳光、大气散射光或地面反射光照明,这种接收到的光能量的变化与人造卫星形状、运行姿态和照明条件密切相关。卫星光学特性与其物理特性,如距离测站的远近、外部形状、尺寸大小、表面涂层、姿态稳定方式及姿态指向等密切相关。在卫星过顶期间,随着时间的变化,卫星距离测站间的距离发生变化,对卫星视星等的大小密切相关,因此需进行斜距改正,视星等归一化到统一距离, $m_{\text{cor}} = m - 2.5 \lg(R^2/R_0^2)$, 其中 m 为视星等, m_{cor} 为斜距改正后的卫星星等(mag)值, R 为卫星与测站间的距离, R_0 为归一化的距离,通过对卫星的视星等进行斜距改正归一化计算以便反映卫星特性与光变过程的相关规律。

斜距定义为测站至卫星的距离,而相位角为太阳-卫星-测站之间的夹角。斜距和相位角在研究空间碎片特性中是两个重要的参数,光学观测时无法通过观测获取这两个参数,需要通过星历计算给出。

J2000 历元天球坐标系下矢量 \mathbf{r} 至站心赤道坐标系下矢量 $\boldsymbol{\rho}$ 的转换关系:

$$\boldsymbol{\rho} = \mathbf{T}_{\text{ER}}^{\text{T}}[\mathbf{T}_{\text{HG}}\mathbf{r} - \mathbf{R}_{\text{A}}], \quad (1)$$

J2000 历元天球坐标系下矢量 \mathbf{r} 至站心地平坐标系下矢量 $\boldsymbol{\rho}'$ 转换关系:

$$\boldsymbol{\rho}' = \mathbf{T}_{\text{ZR}}^{\text{T}}\mathbf{T}_{\text{ER}}^{\text{T}}[\mathbf{T}_{\text{HG}}\mathbf{r} - \mathbf{R}_{\text{A}}], \quad (2)$$

其中 \mathbf{R}_{A} 是测站在地固坐标系中的位置矢量, \mathbf{T}_{HG} 是历元平赤道地心系与地固坐标系之间的转换矩阵, \mathbf{T}_{ER} 是瞬时真赤道地心系与准地固坐标系之间的转换矩阵, \mathbf{T}_{ZR} 是瞬时真赤道坐标系与地平坐标系之间的转换矩阵,有

$$\begin{cases} \mathbf{T}_{\text{ZR}} = \mathbf{R}_z(180^\circ - S)\mathbf{R}_y(90^\circ - \varphi) \\ S = S_G + \lambda \end{cases}, \quad (3)$$

其中 \mathbf{R}_z 与 \mathbf{R}_y 分别是绕 y 轴, z 轴的旋转矩阵, S_G 是格林尼治真恒星时, λ 和 φ 是测站的经度和纬度(天文纬度,可用大地纬度)。

$$\begin{cases} S_G = 18^{\text{h}}.6973746 + 879000^{\text{h}}.0513367t + \\ \quad 0^{\text{s}}.093104t^2 \\ t = \frac{1}{36525.0}[\text{MJD}(t) - \text{MJD}(\text{J2000}, 0)] \end{cases}. \quad (4)$$

其中的引数 t 是世界时(UT1)时间, MJD 为约简儒略日。

$$r = |\boldsymbol{\rho}| = |\boldsymbol{\rho}'| = \sqrt{\rho_x^2 + \rho_y^2 + \rho_z^2}, \quad (5)$$

同时,相位角的计算需要计算太阳、测站和空间碎片之间的相对位置关系,首先通过太阳的平运动参数获取太阳在 J2000 历元天球坐标系的位置 \mathbf{R}_{sun} , 通过(3)式的转换,得到其站心赤道坐标系下的位置 $\boldsymbol{\rho}_{\text{sun}}$, 根据矢量计算公式,可以得到碎片-测站矢量 \mathbf{r}_1 和碎片-太阳矢量 \mathbf{r}_2 :

$$\begin{cases} \mathbf{r}_1 = -\boldsymbol{\rho} \\ \mathbf{r}_2 = \boldsymbol{\rho}_{\text{sun}} - \boldsymbol{\rho} \end{cases}, \quad (6)$$

根据两矢量间的夹角公式,可得相位角(φ_{PA})的计算公式:

$$\varphi_{\text{PA}} = \arccos\left(\frac{\mathbf{r}_1 \cdot \mathbf{r}_2}{|\mathbf{r}_1||\mathbf{r}_2|}\right). \quad (7)$$

3 光照反射模型原理

3.1 光照反射理论模型

地球同步静止轨道距离地球表面约 36000 km, 在 CCD 成像时被观测对象为典型的点源。假定卫星表面的漫反射服从朗伯定律,由于卫星被太阳光照射,其视星等计算关系式为

$$m = -2.5 \lg \left\{ \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} E(\lambda) A \gamma F(\varphi) / [R^2 E_0(\lambda)] d\lambda \right\}, \quad (8)$$

其中 A 为光照截面面积, γ 为反射率, $F(\varphi)$ 为相位函数, φ 为太阳-卫星-观测点的相位角, R 为斜距, 太阳(零等星)的辐照流量 $E_0 = 1365 \text{ W/m}^2$, 太阳

辐射常数,它是地球大气外,在单位时间内投影到距太阳平均日地距离处(即一个天文单位),并且垂直于太阳射线方向的单位面积上的太阳辐射能。卫星测光信号来源主要是太阳光的辐射能量。一般可以认为太阳是绝对温度为 5900 K 的黑体,其一定光谱范围的辐射出射度^[5]:

$$M(\lambda) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \left[\frac{1}{\exp(hc/\lambda kT) - 1} \right] \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}), \quad (9)$$

其中 h 为普朗克常数, c 为真空中的光速, k 为玻尔兹曼常数, T 为太阳的黑体温度。太阳对卫星的单色辐照度

$$E(\lambda) = \frac{M(\lambda)S}{4\pi R^2} \text{W}/(\text{m}^2 \cdot \mu\text{m}), \quad (10)$$

其中 S 为太阳表面积, R 为日地平均距离。在可见光波段($\lambda_1 = 390 \text{ nm} \sim \lambda_2 = 760 \text{ nm}$),

$$E = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} E(\lambda) d\lambda = 671 \text{ W}/\text{m}^2. \quad (11)$$

3.2 漫反射特性相位函数

由于卫星的形状特性比较单一,不同形状的漫反射特性相位函数不同。

球状卫星漫反射反射特性关系式为

$$F(\varphi) = \frac{2}{3\pi^2} [\sin \varphi + (\pi - \varphi) \cos \varphi], \quad (12)$$

其中 φ 为相位角。

球状卫星镜面反射特性关系式为

$$F(\varphi) = \frac{1}{4\pi}, \quad (13)$$

柱状卫星漫反射特性关系式为

$$F(\varphi) = \sin \alpha \sin \beta [\sin \theta + (\pi - \theta) \cos \theta] \\ \theta = \arccos \left[\frac{\cos \varphi - \cos \alpha \cos \beta}{\sin \alpha \sin \beta} \right], \quad (14)$$

其中 α 为太阳入射光线与平面法向的夹角, β 为出射光线与平面法向的夹角^[11]。可利用上述两种形状的光照理论模型计算与卫星测光特性数据的相关性,确定卫星的姿态稳定特性,反映卫星的技术生存状态。

4 观测实验结果及分析

4.1 球状卫星测光观测

以理想球状卫星为观测样本,其中 01361 (Lincoln Calibration Sphere 1, 1965-034C) 为雷达定标星,直径为 1.13 m; 19751 (COSMOS 1989, 1989-001C) 如图 1 所示,直径为 1.294 m。

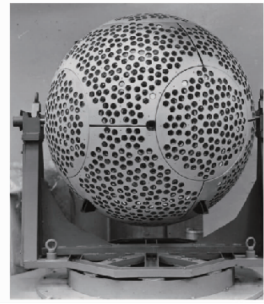


图 1 COSMOS 1989(19751)实物图

Fig. 1 Photo of COSMOS 1989 (19751)

观测结果中斜距归一化为 R_0 , 卫星反照率为 0.6。其中 LCS1 的测光结果分布在 7.25(mag) 至 7.54(mag) 之间,在误差范围内呈水平线性变化,符合镜面反射效应的理论结果特征; COSMOS 1989 的测光结果分布在 6.93(mag) 至 8.17(mag) 之间,呈非线性变化,与球状漫反射的理论计算结果有很好的 consistency, 相关系数为 0.987(如图 2 所示)。上述两个理想形状样本的观测数据结果与理论分析有很好的 consistency, 为分析复杂形状卫星的光变特性提供了样本数据基础。

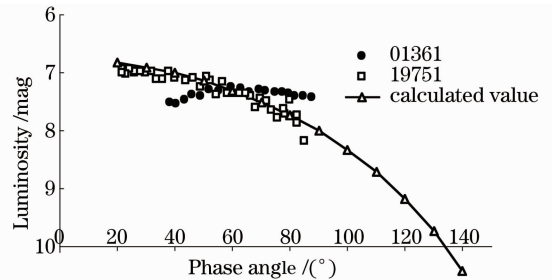


图 2 球状卫星光变曲线

Fig. 2 Light curve of spheroidal satellite 01361 and 19751

4.2 复杂形状卫星光变特性

GORIZONT 28 外形特征(如图 3 所示)为圆柱体加太阳能帆板,尺寸为直径 2 m,长 5 m,和两个太阳能帆板,展开总跨度为 10 m,姿态稳定方式为三轴稳定。

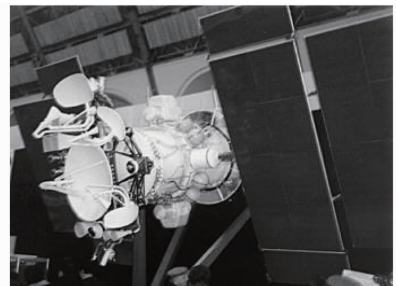


图 3 GORIZONT 28 (22880) 实物图

Fig. 3 Photo of GORIZONT 28(22880)

GORIZONT 28 的流量变化范围为 10~15(mag) (如图 4 所示), 波峰处于相位角 23° 附近区域, 其流量骤然增强, 与漫反射模型模拟计算结果之间的偏差最大为 2.5(mag), 分析为太阳能电池板的镜面反射效应所致。在相位角的其余取值区域, 随着相位角的减小, 流量值存在平缓增大的趋势, 分析光变以卫星主体和太阳能电池板的漫反射效应为主, 与漫反射模型模拟计算结果之间的偏差最大为 0.1(mag)。

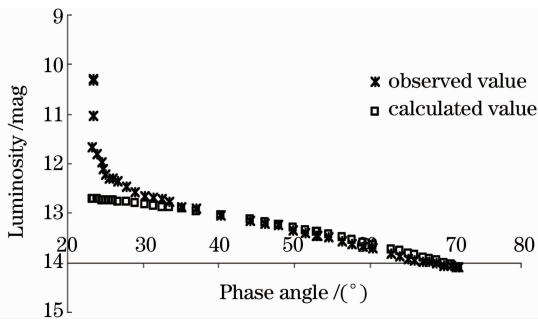


图 4 GORIZONT 28 光变曲线

Fig. 4 Light curve of GORIZONT 28

在漫反射柱状模型计算中太阳入射波段为可见光波段(380~760 nm), 在大相位角区域, 即在观测相位角大于 45° 时, 漫反射模型理论计算结果与观测得到的光变曲线有很好的 consistency, 两个卫星的观测结果与理论模拟计算结果之间的偏差较小, 该区域以卫星主体和太阳能电池板的漫反射效应为主。数据结果也进一步表明光变曲线在小相位角区域与漫反射模型计算结果有明显的差异, 偏差在相位角小于 30° 附近时突然变大, 最大达到 2.5(mag), 分析为卫星的太阳帆板镜面反射效应影响所致。

COSMOS 2224 (22269), 形状为柱状加太阳能帆板, 姿态稳定方式为三轴稳定, 尺寸为直径 4 m, 长 6.5 m, 姿态稳定方式为三轴稳定(如图 5 所示)。

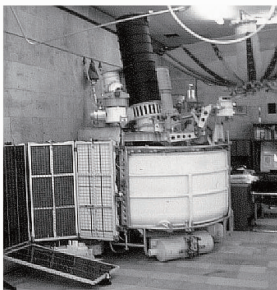


图 5 COSMOS 2224 (22269) 实物图

Fig. 5 Photo of COSMOS 2224 (22269)

COSMOS 2224 的测光数据分布在 15.5(mag) 至 16.45(mag) 之间, 少量尖锐脉冲为太阳能帆板的镜面反射结果, 光变曲线在相位角 $25^\circ \sim 45^\circ$ 时呈非

线性变化, 与球状漫反射特征模型的相关性为 0.95。而在相位角 $45^\circ \sim 65^\circ$ 时呈线性变化趋势, 符合镜面反射特征, 与球状卫星的光变特性完全一致(如图 6 所示)。测光结果表明该卫星已从三轴稳定状态变化为自由翻滚状态, 技术状态可判断为已失控。

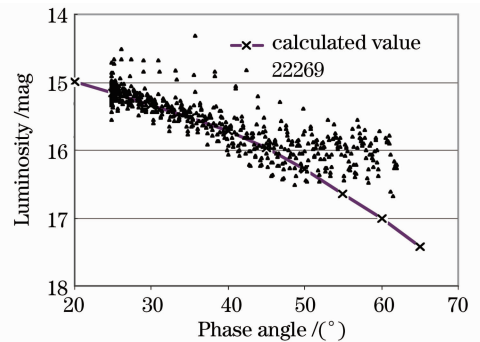


图 6 COSMOS 2224 光变曲线

Fig. 6 Light curve of COSMOS 2224

5 结 论

以不同形状的中高轨卫星为研究样本, 在分析球形卫星的镜面反射和漫反射光变特性基础上, 进一步探讨了复杂形状卫星的光变特征, 并对理论模型和观测数据进行对比分析。数据结果表明, 光变曲线与卫星的特性, 如生存状态、形状、姿态控制方式等有关联, 可为确定卫星的历史演化过程, 分析卫星的技术生存状态提供判定依据。

参 考 文 献

- 1 R. H. Emmons, C. L. J. Rogers, R. J. Preski *et al.*. Photometric observations of artificial satellites for determining optical and physical characteristics [J]. *The Astronomical Journal*, 1967, **72**(8): 939~944
- 2 J. Africano, P. Kervin, D. Hall *et al.*. Understanding photometric phase angle corrections [C]. *Proc. 4th European Conf. on Space Debris*, 2005: 141~146
- 3 T. E. Payne, S. A. Gregory, K. Luu *et al.*. Electro-optical signatures comparisons of geosynchronous satellites [C]. *Aerospace Conference, IEEE*, 2006
- 4 Wu Zhensen, Dou Yuhong. Visible light scattering and infrared radiation of spatial object [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(10): 1250~1254
- 5 吴振森, 窦玉红. 空间目标的光散射与红外辐射 [J]. *光学学报*, 2003, **23**(10): 1250~1254
- 6 Liu Jianbin, Wu Jian. Light scattering of spatial target [J]. *J. Astronautics*, 2006, **27**(4): 802~805
- 7 刘建斌, 吴 健. 空间目标的光散射研究 [J]. *宇航学报*, 2006, **27**(4): 802~805
- 8 Che Chicheng, Li Yingcai, Chen Rongli *et al.*. Research on feasibility of GEO target visual detection [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2007, **36**(5): 905~908
- 9 车驰骋, 李英才, 陈荣利 等. 地面可见光相机探测静止轨道目标可行性研究 [J]. *光子学报*, 2007, **36**(5): 905~908
- 10 Tang Yijun, Jiang Xiaojun, Wei Jianyan *et al.*. Review of optical

- observations of high apogee space debris[J]. *J. Astronautics*, 2008, **29**(4): 1094~1098
- 唐轶峻,姜晓军,魏建彦等. 高轨空间碎片光电观测技术综述[J]. *宇航学报*, 2008, **29**(4): 1094~1098
- 8 Zhang Jihua, Yao Dongsheng, Tan Bin. Analysis on effect factors of ground-based electro-optic system detection ability on space object[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(6): 1178~1182
- 张己化,姚东升,谈斌. 地基光电系统空间目标探测影响因素分析[J]. *光学学报*, 2008, **28**(6): 1178~1182
- 9 Li Yanan, Sun Xiaobing, Qiao Yanli. Waveband selection for space target detection and identification[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(1): 67~71
- 李雅男,孙晓兵,乔延利. 空间目标探测与识别的波段选择[J]. *光学学报*, 2009, **29**(1): 67~71
- 10 Wang Hongyuan, Zhang Wei, Wang Zhile. Visible characteristics of space satellite based on Nth cosine scattering distribution[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(3): 593~598
- 汪洪源,张伟,王治乐. 基于高次余弦散射分布的空间卫星可见光特性[J]. *光学学报*, 2008, **28**(3): 593~598
- 11 G. A. McCue, J. G. Williams, J. M. Morford. Optical characteristics of artificial satellites[J]. *Planetary and Space Science*, 1971, **19**(8): 851~868

《中国激光》“全固态激光技术”专题 征 稿 启 事

全固态激光技术是目前我国在国际上为数不多的从材料源头到激光系统集成拥有整体优势的高技术领域之一,全固态激光器件与材料研究的迅速发展,对激光先进制造技术、激光显示技术和激光医疗等领域的发展产生了巨大的推动作用,已取得大量研究成果。《中国激光》已于2009年7月出版“全固态激光技术”专集,得到了本领域很多院士和知名专家的大力支持,发表了多篇国内知名课题组的全固态激光技术发展前沿领域的文章,反响非常好。应广大专家、作者和读者的要求,《中国激光》计划于2010年7月继续推出“全固态激光技术”专题栏目,现特向国内外广大研究人员征集“全固态激光技术”方面原创性的研究论文和综述,旨在集中反映该方面最新的研究成果及研究进展。

征稿范围包括:

- 连续全固态激光器;
- 脉冲全固态激光器;
- 光纤激光器;
- 其他

截稿日期:2010年4月15日

投稿方式以及格式:可通过中国光学期刊网网上投稿系统直接上传稿件(主题标明“全固态激光技术”投稿),详情请参见 <http://www.opticsjournal.net/zgjj.htm>。本专题投稿文体不限,中英文皆可,其电子版请使用MS-word格式,有任何问题请咨询马沂编辑,E-mail: CJL@siom.ac.cn;电话:021-69918427。

《中国激光》编辑部