

## 雷达定标卫星光学散射特性研究

王建峰<sup>1,2</sup>, 姜晓军<sup>1,2</sup>, 李陶然<sup>1</sup>, 张晓明<sup>1</sup>, 葛亮<sup>1</sup>

(1. 中国科学院光学天文重点实验室(国家天文台), 北京 100101;  
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 对主体为铝球用于雷达定标的一批卫星进行了地基光学观测, 验证了其光度变化和光谱特性简单, 易于开展光度和光谱特性影响因素分析。实验室对铝球的仿真测量也证明了铝球具有各向同性好、反射特性和光谱特性平稳等特点。研究团队基于测量结果构建了铝制球体卫星的光度计算模型, 与实测结果的对比分析表明, 利用铝制球体的材料特性和外形特征可最大程度的简化卫星光度计算模型, 也证明了实测方法和光度计算模型构造方法的正确性, 使得卫星光度可实时保精计算, 可应用于天基和地基光电探测设备的动态能量定标和高速、变速运动状态下的探测能力标定。

**关键词:** 光学散射特性; 雷达定标卫星; 铝球; 光度

**中图分类号:** O432.2   **文献标志码:** A   **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0105003

## Research on optical scattering of radar calibration satellite

Wang Jianfeng<sup>1,2</sup>, Jiang Xiaojun<sup>1,2</sup>, Li Taoran<sup>1</sup>, Zhang Xiaoming<sup>1</sup>, Ge Liang<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Optical Astronomy, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Science, Beijing 100101, China;  
2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** We conducted ground-based optical observations on a group of satellites used for radar calibration, whose main parts were aluminum balls. Our observations verified their luminosity changes and spectral characteristics were simple, and it was easy to carry out analyses on the factors which affected luminosity and spectral characteristics. The simulation measurement in the laboratory for the aluminum ball also shows its characteristics of good isotropicity, stable reflective and spectral characteristics. Based on the measurement results, we constructed the luminosity calculation model for the aluminum-ball satellite. Comparing with the measured results, we found that the characteristics of the material and shape characteristics of the aluminum ball can simplify the satellite photometric calculation model to the greatest extent. Moreover, the methods of the measurement and the luminosity calculation model construction were also proved to be correct, enabling the real-time satellite luminosity calculation, which can be applied to the dynamic flux calibration and the calibration of the detection capability under fast and variable-speed motion of space-based and ground-based optical detection equipment.

**Key words:** optical scattering properties; radar calibration satellite; aluminum ball; photometry

收稿日期: 2019-09-05; 修订日期: 2019-10-15

基金项目: 国家自然科学基金(U1731131); 中国科学院青年创新促进会(2017077)

作者简介: 王建峰(1981-), 男, 高级工程师, 博士生, 主要从事人造卫星特性分析方面的研究。Email: wjf@nao.cas.cn

导师简介: 姜晓军(1970-), 男, 研究员, 博士生导师, 博士, 主要从事人造卫星特性分析和光学天文望远镜方面的研究。

Email: xjjiang@nao.cas.cn

## 0 引言

近年来,物理特性测量成为人造地球卫星观测研究的热点。在传统位置测量的基础上,通过高分辨率成像、光度观测、光谱观测、雷达特性测量等观测方法进一步获取卫星面型特征、精确流量信息、光谱信息、雷达反射参数等,通过分析可获取卫星自身的物理特征,为卫星的工作状态判别和故障辅助诊断服务。

近些年来,笔者所在课题组(下简称课题组)基于地基光学望远镜利用非成像方法对卫星的光度和光谱持续开展观测研究,取得了一系列的进展。如通过对地球同步轨道卫星的光度变化曲线分析,可以得出卫星的姿态稳定状态、稳定方式、大小尺度等;中低轨卫星则可进一步获取光谱信息,获得表面材料组成,并可开展相关的分类识别研究<sup>[1-7]</sup>。

在对卫星光度和光谱观测研究过程中,课题组遵循从简单到复杂再回归简单的认知过程。光照可视关系是影响卫星光电探测的一项重要因素,在先期的探索研究中,光度研究也是从光照可视关系较为简单的地球同步轨道卫星入手研究,在掌握部分规律后才拓展到光照可视关系较为复杂的中轨卫星和低轨卫星的观测分析中。

卫星形状是影响卫星光度和光谱特征的一项重要因素,课题组发现部分雷达定标卫星拥有标准的球体外形,如美国的 Calibration Sphere(Calsphere)卫星和 Lincoln Calibration Sphere(LCS)卫星等。该类球体目标由于其外形和材料特点非常适合开展相应的光度和光谱观测分析,例如 LCS 卫星,其外形简单、表面材质单一,为直径 1.12 m、厚 3.2 mm、重 34 kg 的中空铝球体<sup>[8]</sup>。该型的两颗卫星先后于 1965 年(LCS-1,USSPACECOM 编号 01361)和 1971 年(LCS-4,USSPACECOM 编号 05398)发射,其中 LCS-1 轨道为高度 2700 km 的圆轨道(设计寿命为 30 000 年),LCS-4 轨道为高度 750 km 左右的近圆轨道(设计寿命为 75 年)。在发射前,已经在实验室对这两颗卫星进行了 L、S、C、X 和 K 波段的雷达定标测量。

文中针对这两颗外形简单、材质单一的卫星进行了实际观测分析,利用实验室设备对铝球进行了仿真测量,建立了光度计算模型并与实测数据进行分析对比,验证了建模方法的正确性和建模精度,并

提出了该建模方法的具体应用设想。

## 1 雷达定标卫星的观测实验

课题组利用国家天文台兴隆观测基地的 1 m 和 50 cm 光学望远镜对 LCS-1 和 LCS-4 分别进行了光度和光谱观测,这两台望远镜都具备对轨道高度 300 km 及以上卫星的跟踪观测能力。

美国雷达定标卫星 Calsphere 和 LCS 如图 1 所示。

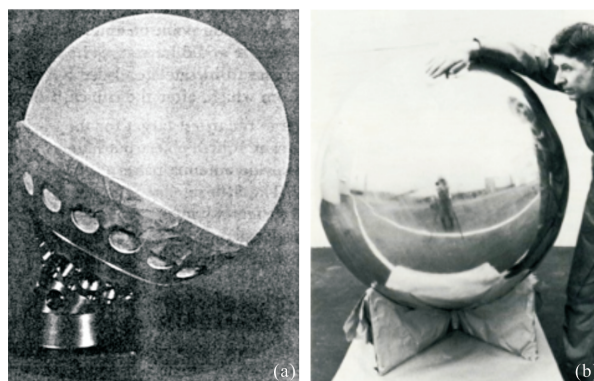


图 1 美国雷达定标卫星 Calsphere(a)和 LCS(b)

Fig.1 US radar calibration star Calsphere (a) and LCS (b)

1 m 望远镜采用地平式转台,主镜有效口径为 1 m,配置了三通道三色测光终端,可对卫星在三个波段同时成像。望远镜相关参数见表 1。

表 1 1 m 光学望远镜主要技术参数

Tab.1 Specifications of the 1 m optical telescope

Index	Parameters		
	Channel <i>g</i>	Channel <i>r</i>	Channel <i>i</i>
Diameter	1 m naismith focus		
Focus type	Naismith focus		
Focal length after reducer	5 m ( <i>f</i> /5)		
CCD FOV/(°)	19.0×19.0	18.4×17.9	9.2×9.2
Detection ability/mV, 1 s exposure)	16.1	16.3	14.6
CCD chip size/pixel	2 048×2 048	1 340×1 300	1 024×1 024
Pixel size/μm	13.5×13.5	20×20	13×13
Filter	SDSS <i>g'</i> <i>r'</i> <i>i'</i>		

实验按照光度观测的标准流程,经过图像采集、数据处理及利用恒星的流量定标后<sup>[9]</sup>,获取这两颗卫星位于大气层外的标准光度。通过一定时间的观测可得卫星亮度随时间的变化情况,即为光变曲线(见图 2 和图 3)。

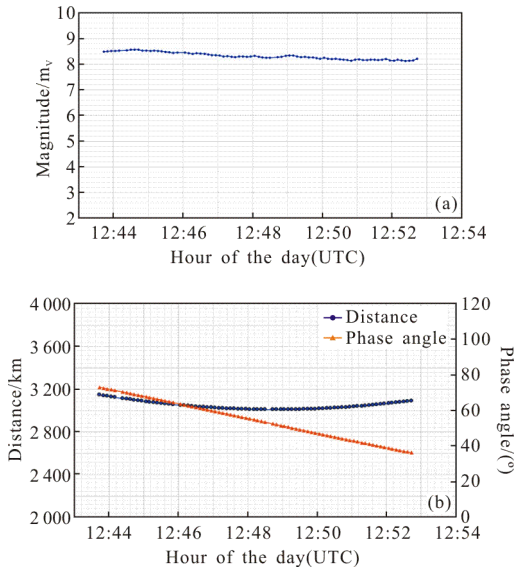


图 2 实测 LCS-1 光变曲线图(a)和斜距、相位角随时间变化(b)  
Fig.2 LCS-1 light curve (a) and distance, phase angle change with time (b)

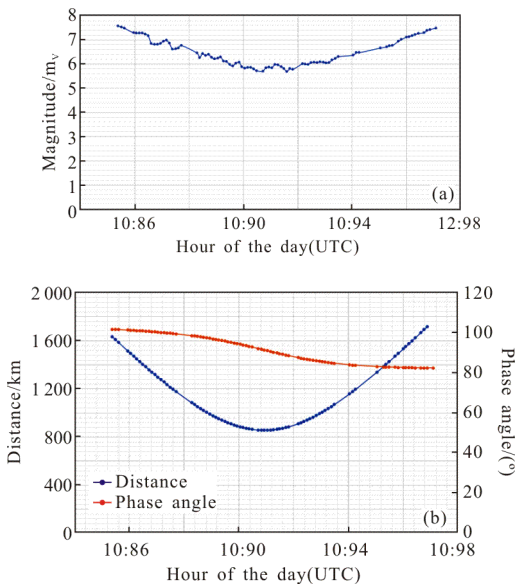


图 3 实测 LCS-4 光变曲线图(a)和斜距、相位角随时间变化(b)  
Fig.3 LCS-4 light curve (a) and distance, phase angle change with time (b)

50 cm 望远镜采用赤道式转台,也同样具备高速运动和高精度跟踪能力,望远镜配置了低色散光谱测量终端,可观测获取卫星的光谱信息。望远镜相关技术参数见表 2。

对卫星观测采用光谱拍摄的标准流程,经过图像采集、图像处理及利用恒星的波长和流量定标后,获得卫星光谱信息<sup>[9]</sup>。课题组每次对卫星观测可以获取

表 2 50 cm 光学望远镜主要技术参数

Tab.2 Specifications of the 50 cm optical telescope

Index	Parameters
Diameter/cm	50
Focus type	Cassegrain
Focal length	4 m( $f/8$ )
CCD FOV/(')	23.0×22.3
CCD chip size/pixel	1 340×1 300
Pixel size/ $\mu\text{m}$	20×20
Band range/nm	400–800
Number of bands	70
Detection ability/ $m_v$	9.0
Coating efficiency	400–800 nm, $T > 98\%$ ; 300–400 nm and 780–960 nm, $T < 1\%$
Diffraction efficiency	$\geq 30\%$

多幅图像,每幅图像可处理得到一条光谱曲线。为了表现卫星光谱的变化,故在常规光谱的波长-强度图上引入相位角(与时间相关)表征图像序列,则一个观测序列的光谱数据如图 4、5 所示。

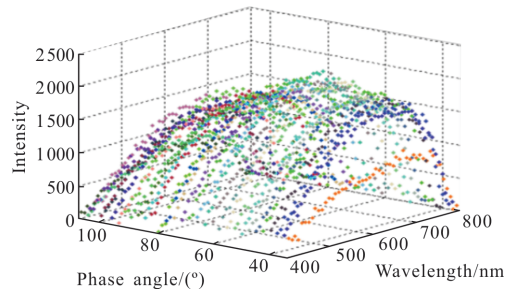


图 4 50 cm 望远镜实测的 LCS-1 光谱

Fig.4 Spectra of LCS-1 observed by the 50 cm telescope

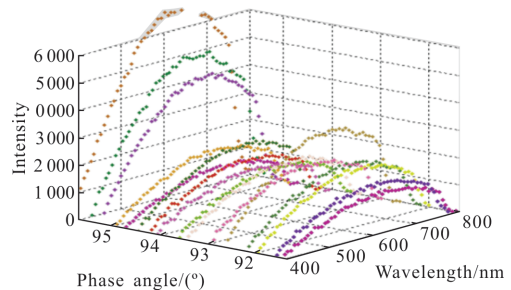


图 5 50 cm 望远镜实测的 LCS-4 光谱

Fig.5 Spectra of LCS-4 observed by the 50 cm telescope

由以上实测数据分析,LCS-1和 LCS-4 这两颗雷达定标卫星的实测光变曲线相对较为平缓,主要与低轨卫星过境时斜距和光照可视关系变化有关。

光谱数据在不同相位角时存在差异,如图 5 中在相位角超过 95°时变化较为剧烈,除了与斜距和光照可视关系变化有关,还与未进行流量归一化和太阳光谱扣除的改正处理有关,后续分析将进行改正处理。

## 2 实验室光学散射特性测试

为了进一步验证和掌握铝制球体的光学特性,利用实验室测量设备进行了仿真测量,测量对象为直径 6.35 mm 和 8 mm 铝球(见图 6),这两种铝球从市场直接购买,未经精细打磨。



图 6 测试使用的铝球(6.35 mm 和 8 mm)

Fig.6 Aluminum balls used in the measurements(6.35 mm and 8 mm)

实验采用法国 LightTec 公司的 REFLET-180S 散射测量系统,该系统可对任何材料和物体进行三维全自动扫描和测量,快速获取三维空间内不同方位角和入射角时的光散射分布和双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)。系统包含光源、探测器、转台、样品台和电机控制系统。光源采用 100 W 的卤素灯,其光谱与太阳连续光谱接近,光斑大小从 1~13 mm 手动调节,通过悬臂转动以改变入射角(0°~180°);探测器可在可见光和红外波段工作,波段分别为 400~1 000 nm 和 900~1 700 nm,探测器固定在两轴转台上,两轴分别

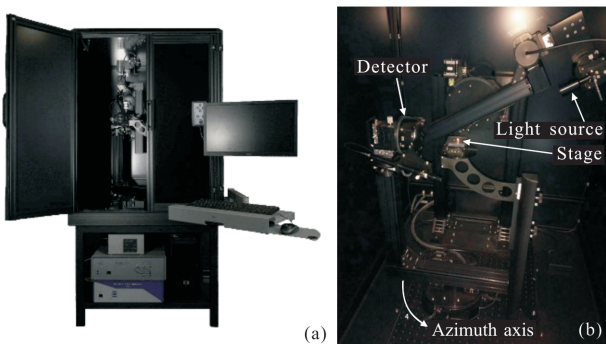


图 7 REFLET-180S 散射测量系统

Fig.7 REFLET-180S scatterometry system

为方位角(-90°~90°)和散射角(-90°~90°)。光源和探测器的测角系统位置精度均为 0.01°。

### 2.1 BRDF 测量

该系统的 BRDF 测量采用相对测量法,利用标准漫反射参考白板进行定标后转换为 BRDF 值。定标板是一种可用作反射实验标准参照物的理想朗伯表面的漫反射塑性白胶。定标过程中,入射角为 0°,方位角-90°,散射角 30°。

仪器中设置可见光波长范围为 400~900 nm。测量时分别对直径 6.35 mm 和 8 mm 的铝球记录 BRDF 值。铝球的入射角间隔 15°测量,探测器方位角选取 -90°~0°,每隔 10°测量一次;散射角选取为 -90°~90°,每隔 0.1°记录一次。

图 8 和图 9 分别是 6.35 mm 和 8 mm 铝球的 BRDF 曲线。入射角和散射角均为 0°,光源和探测器分别位于样品两端,因此 BRDF 曲线会出现极小值,接近于 0。随着入射角的改变,极小值的位置也发生变化。当散射角等于入射角处且方位角为-90°时,此

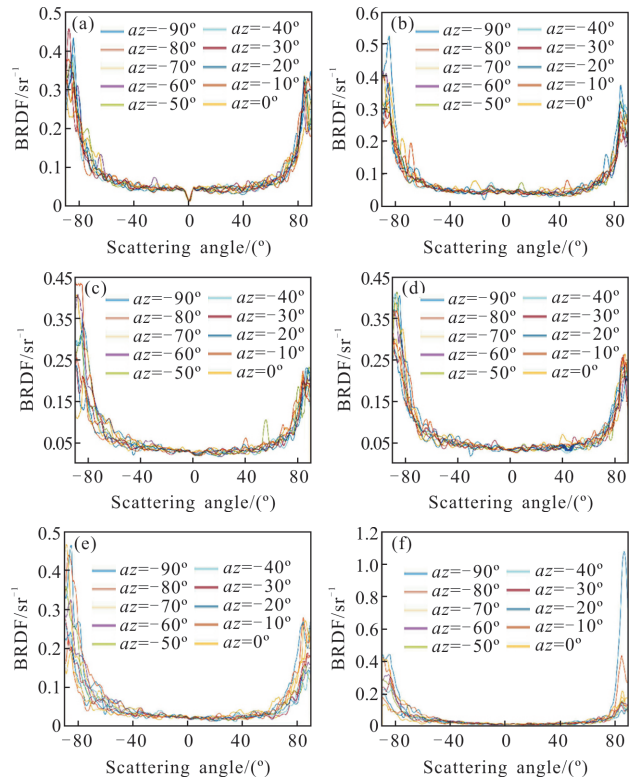


图 8 6.35 mm 铝球的 BRDF 曲线(入射角分别为 0°、15°、30°、45°、60°、75°,不同颜色曲线代表不同方位角)

Fig.8 BRDF curves of 6.35 mm aluminum ball (incident angles are 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, different colors represent different azimuth angles)

时光线被样品遮挡, BRDF 曲线会在此处产生波谷。当入射角改变时, 铝球的 BRDF 曲线形状变化不大, 可以证明铝球的各向同性较好。若样品为完美的铝球, 则曲线应平滑且以 0 点左右对称。通过对比两种尺寸铝球的 BRDF 曲线 (图 10) 可知, 8 mm 铝球和 6.35 mm 铝球的 BRDF 曲线整体上一致。

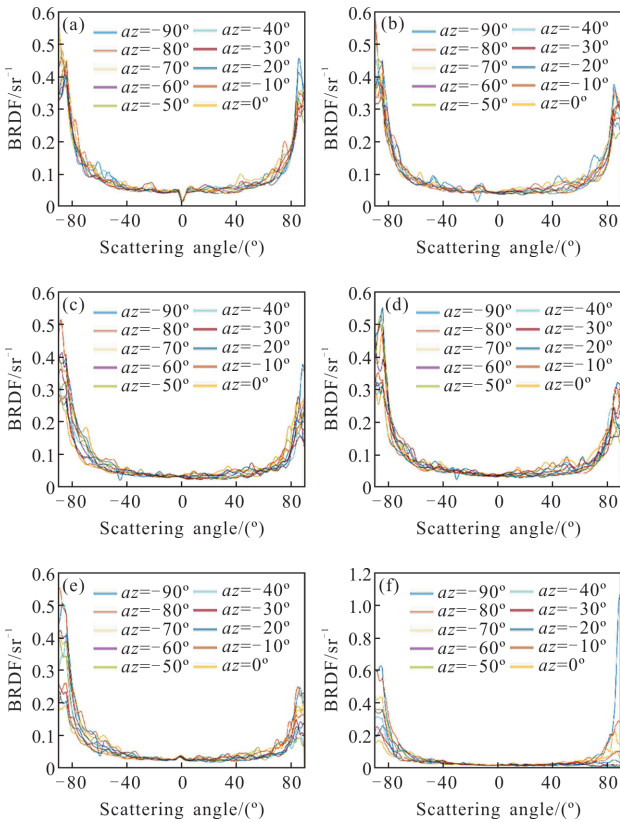


图 9 8 mm 铝球的 BRDF 曲线(入射角分别为 0°、15°、30°、45°、60°、75°, 不同颜色曲线代表不同方位角)

Fig.9 BRDF curves of 8 mm aluminum ball (incident angles are 0°, 15°, 30°, 45°, 60°, 75°, different colors represent different azimuth angles)

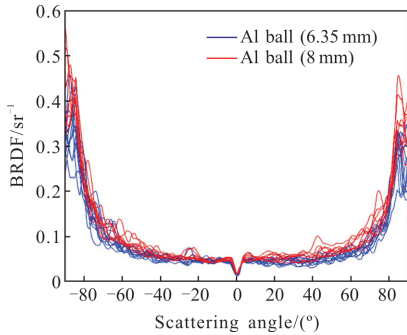


图 10 0°入射角时 6.35 mm 和 8 mm 铝球的 BRDF 曲线

Fig.10 BRDF curves of 6.35 mm and 8 mm aluminum balls at 0° incident angle

## 2.2 光谱特性测量

课题组也利用该设备测量了两种铝球的反射光谱<sup>[11]</sup>, 同时也测量了不锈钢球和铜球的反射光谱以进行对比, 获得了不同样品(两种铝球、304 不锈钢球和铜球)的反射光谱曲线(见图 11)。

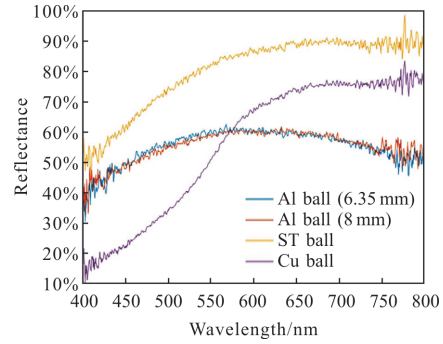


图 11 不同材料球体的反射光谱曲线

Fig.11 Reflectance spectra of spheres of different materials

数据分析可见: 4 种球体的反射光谱曲线均在 400~450 nm 和 700~800 nm 处跳动较大, 这是由于光源能量不足、探测信噪比低引起的测量精度降低; 在 450~700 nm 间的曲线较为平缓。从 4 种球体的光谱曲线构型上分析, 铜球和不锈钢的光谱曲线随波长升高, 整个波段的反射率变化较大, 两种铝球的光谱曲线则较为一致, 且在整体波段上变化较小。

同时, 课题组也对实际测量的 LCS-1 和 LCS-4 光谱进行流量归一化和太阳光谱扣除的改正处理, 获取卫星自身材料光谱信息(见图 12 和图 13), 与实验室铝球测量结果对比较为一致, 直接表现为铝的材料特性。

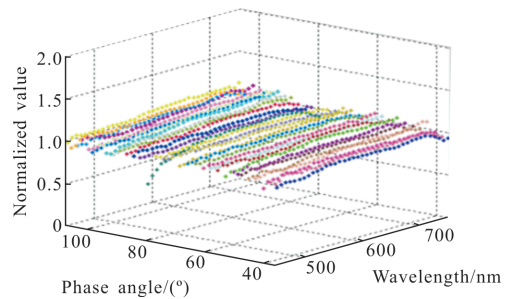


图 12 改正后的 LCS-1 光谱

Fig.12 Corrected spectra of LCS-1

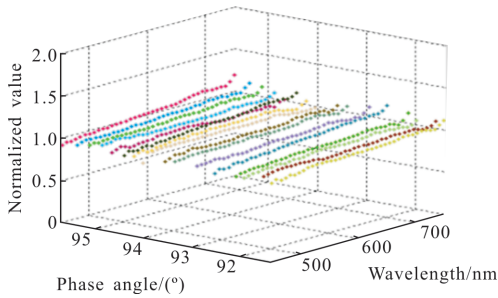


图 13 改正后的 LCS-4 光谱

Fig.13 Corrected spectra of LCS-4

综合以上 BRDF 和反射光谱的分析, 铝球的反射光谱相对其他材料(铜、不锈钢等)球体较为平缓, 光谱特性稳定, 且其 BRDF 的各向同性较好。

### 3 仿真建模分析

获得了卫星的实测数据和实验室仿真测试数据后, 课题组构建了铝制球体的光度计算模型, 验证仿真和观测结果之间的符合度。

#### 3.1 光度计算模型

人造卫星的亮度主要来源于其反射的太阳光, 亮度主要受到太阳辐射流量密度、卫星自身尺寸、外表面材料反射特性、光照可视关系和距离等因素影响。根据天文实测结果, 太阳辐射密度在地球附近接近为常量(太阳常数); 对于已知外形尺寸的球体卫星可精确计算其截面积; 铝球表面材料反射特性亦可在实验室精确测量; 而球体目标的光照可视关系也相对简单。

对于一个各向同性的均匀球体, 其被光源照亮且被探测设备观测到的情况可以用相位角(即光源-目标-观测设备之间的夹角)表征, 被光源照亮的部分和设备所能观测的部分均为半球, 这两个半球重合的部分即为实际照亮可见部分, 照亮百分比可用以下公式表达:

$$\alpha = \frac{180-A}{180} \quad (1)$$

式中:  $\alpha$  为照亮百分比;  $A$  为相位角。

根据以上分析, 卫星亮度受到目标尺寸、照亮百分比、卫星与设备距离及卫星反照率等影响, 根据星等计算公式:

$$\text{Mag} = \text{Mag}_0 - 2.5 \times \left( \frac{\text{Flux}}{\text{Flux}_0} \right) \quad (2)$$

可得球体目标的星等计算公式如下:

$$\text{Mag} = \text{Mag}_{\text{sun}} - 2.5 \times \left( \frac{S}{R_p^2} \times \frac{180-A}{180} \times v \right) \quad (3)$$

式中: 太阳的流量信息经过精确定标, 即  $\text{Mag}_{\text{sun}}$  为  $-26.74$  等;  $S$  为卫星的截面积;  $R_p$  为目标和观测设备之间的距离;  $v$  为反照率。

通过以上构造的计算模型, 根据铝制球体卫星的尺寸、位置信息和表面反照率即可计算亮度信息(星等)。

#### 3.2 模型计算与实测结果的对比分析

通过卫星轨道根数进行轨道计算获取观测时刻卫星的斜距和相位角信息, 根据仿真测量结果设置综合反照率为 0.1, 由卫星的直径(1.12 m)计算其截面积为  $0.985 \text{ m}^2$ , 利用公式(3)可计算其亮度(星等值), 并与实测亮度对比, 结果如图 14 和图 15 所示。

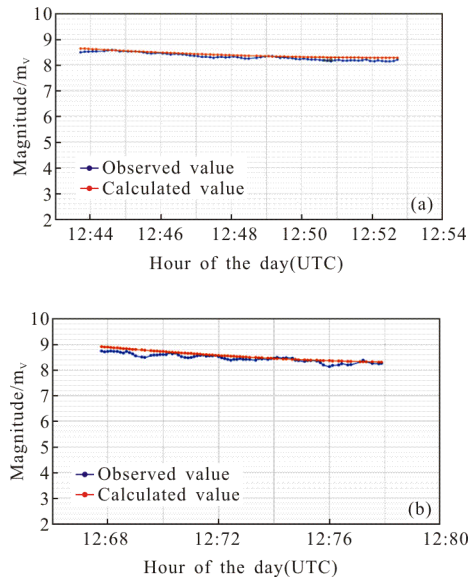


图 14 LCS-1 实测星等与计算星等。(a) 2016 年 10 月 31 日的结果, (b) 2016 年 11 月 1 日的结果

Fig.14 Observed magnitude and calculated magnitude of LCS-1.

(a) result of October 31, 2016, (b) result of November 1, 2016

通过对 LCS-1 和 LCS-4 两颗铝制球体卫星实测数据和模型计算结果的对比分析, 验证了单一材料和简单外形(铝制球体)的卫星, 可简化卫星光度计算模型, 使卫星亮度可实时计算, 且与实际观测有较好符合。如果在发射前对铝制球体卫星进行详细光学反射特性测量, 获取其精确反射特性, 则计算模型会更加精细, 可进一步提升光度计算精度。

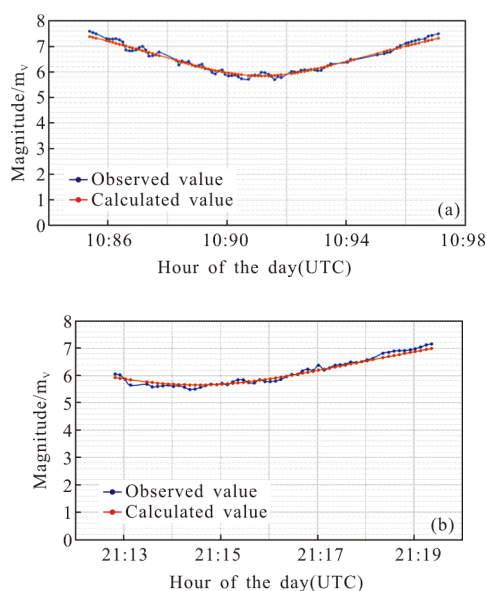


图 15 LCS-4 的实测星等与计算星等。(a) 2015 年 1 月 30 日的结果;(b) 2015 年 2 月 12 日的结果

Fig.15 Observed magnitude and calculated magnitude of LCS-4.  
 (a) result of January 30, 2015; (b) result of February 12, 2015

## 4 结 论

文中首先利用地基光学望远镜对单一材质、外形结构简单的雷达定标卫星进行观测获取卫星光度和光谱数据。再对铝制球体的 BRDF 和反射光谱分别进行了实验室测量和分析,验证了其 BRDF 具有很好的各向同性,且测量光谱与实测结果符合较好,反射光谱平缓。最后构建了铝制球体的光度计算模型,将计算结果与实测结果进行了对比分析,验证了建模方法的有效性。

利用铝制球体的材料特性和外形特征,最大程度上降低了影响卫星亮度(星等)的外形结构、材料反射特性和光照可视关系等因素的影响,简化了卫星光度仿真计算模型,构建了实测和仿真计算的桥梁,证明了实测方法和光度计算模型构造方法的正确性。后续可在此模型上进行细化,以尝试应用至其他外形为长方体、复杂球体、多面体的卫星的光度仿真分析。

基于铝制球体卫星光学散射特性及光度建模计算方法,后续可以做如下应用探索:

(1) 以该类卫星为原型建立天基能量定标系统针对越来越多的光电探测系统保精能量探测的

需求,可以参照该类卫星为原型建立天基能量定标系统,服务于天基和地基光电设备高精度能量获取,具体可以有三种方法如下:

1) 以现有铝制球体卫星为主建立系统

调研分析在轨的铝制球体卫星,利用地基高精度测光望远镜进行密集观测,构建高精度光度计算模型,并基于与模型符合度进行筛选,构建定标系统。该方法利用现有卫星且不额外占用资源;但存在需要大量验证观测、卫星表面材料特性及状态未知、模型构建困难、合用卫星少等缺点。

2) 计划中卫星系统的复用和发射搭载

调研分析处于计划阶段的卫星系统,评估定标系统与其复用的可行性,在不影响原系统功能的前提下,卫星本体以铝材包覆成球形或其他规则形状,并在地面进行详细材料散射特性测量,构建精细计算模型。

同时笔者可研制小型铝球系统,保证其形状和表面材料特性符合系统定标要求,采用搭载发射方式进入轨道构建定标系统。

这两种方法都是利用已有卫星系统或发射机会,不需要专门的卫星发射服务,但前者需要对卫星外表面进行更改设计,受限较大,后者将受火箭搭载的尺寸和重量限制,且两种方法都受到原卫星轨道的限制,定标系统能力和建设进度将受较大制约。

3) 建立专用定标系统

利用指定形状的铝制卫星,建立全新的专用定标系统。在卫星本体设计上,对外形和表面材料进行精细设计和测试,掌握卫星表面结构和材料特性,细化光度计算模型。在轨道上采用不同轨道高度的星座设计,并考虑重访周期、覆盖地域、动态速度等系统要求进行精细轨道设计和系统仿真。该方法系统性强、覆盖性好、速度覆盖全,但需专门研制和发射卫星星座系统,耗费高。

(2) 服务于天基和地基光电设备的探测能力标定

光电探测设备的探测能力主要由几项重要指标决定,如指向精度、跟踪精度、跟踪速度及探测极限等。指向精度、跟踪精度和跟踪速度都可以通过对恒星及人造卫星的跟踪进行检测,但探测能力(星等极限)一般是对指标要求的既定亮度恒星的跟踪拍摄和数据处理进行检测。该方法实际测试的是设备在低速和定速跟踪时(15"/s)的设备探测极限,而不是

在常规工作时(高速和变速跟踪)的实际探测能力。

采用不同轨道设计的铝制球体卫星星座可以提供不同的过境速度、结合一定精度的亮度预报能力,可服务于天基或地基设备在高速和变速跟踪下的系统探测极限能力标定。

#### 参考文献:

- [1] Tang Yijun, Jiang Xiaojun, Wei Jianyan, et al. Review of optical observations of high apogee space debris [J]. *Journal of Astronautics*, 2008, 29(4): 1094–1097. (in Chinese)  
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): 1094–1097.
- [2] Linares R, Jah M K, Crassidis J L, et al. Space object shape characterization and tracking using light curve and angles data [J]. *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, 2014, 37(1): 13–25.
- [3] Han Yi, Sun Huayan. Advances in space target optical scattering character research [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(3): 758–766. (in Chinese)  
韩意, 孙华燕. 空间目标光学散射特性研究进展 [J]. 红外与激光工程, 2013, 42(3): 758–766.
- [4] Gao Xin, Wang Jianli, Zhou Sizhong, et al. Photometric characteristic measurement of space target [J]. *Opto-Electronic Engineering*, 2007, 34(3): 42–45. (in Chinese)  
高昕, 王建立, 周泗忠, 等. 空间目标光度特性测量方法研究[J]. 光电工程, 2007, 34(3): 42–45.
- [5] Richard Linares, Moriba K Jah, John L Crassidis, et al. Astrometric and photometric data fusion for inactive space object mass and area estimation[J]. *Acta Astronautica*, 2014, 99(1): 1–15.
- [6] Li Peng, Li Zhi, Xu Can. Research on mapping relationship for experimental measurement of optical characteristic of Space target [J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2016, 35(3): 75–79. (in Chinese)  
李鹏, 李智, 徐灿. 空间目标光学特性实验测量映射关系研究[J]. 国外电子测量技术, 2016, 35(3): 75–79.
- [7] Yang Ming, Han Lei, Wu Xiaodi, et al. Visible light scattering of satellite based on bidirectional reflectance distribution function [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2010, 47(11): 112901. (in Chinese)  
杨明, 韩磊, 吴晓迪, 等. 基于 BRDF 条件下卫星可见光散射特性分析 [J]. 激光与光电子学进展, 2010, 47(11): 112901.
- [8] Prosser R T. The Lincoln calibration sphere [J]. *Proceedings of the IEEE*, 1965, 53(10): 1672–1673.
- [9] Zhuang Chen, Sui Chenghua, Tang Yijun. Research of photometric calibration of Geosynchronous-Orbit(GEO) space debris [J]. *Astronomical Research & Technology*, 2011, 8(4): 343–346. (in Chinese)  
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] Jin Xiaolong, Tang Yijun, Sui Chenghua. A review on the acquisition and analysis methods of spectral characteristics of space debris[J]. *Chin J Space Sci*, 2014, 34(1): 95–98. (in Chinese)  
金小龙, 唐轶峻, 隋成华. 空间碎片光谱特性获取与分析方法研究[J]. 空间科学学报, 2014, 34(1): 95–103.
- [11] Xu Rong, Zhao Fei, Li Huaifeng, et al. Parallel measurement of spectral bidirectional reflectance distribution function of non-resolved space objects in laboratory [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, 45(2): 13–18. (in Chinese)  
徐融, 赵飞, 李怀峰, 等. 非分辨空间目标光谱双向反射分布函数的实验室平行测量[J]. 光子学报, 2016, 45(2): 13–18.