

doi: 10.3788/gzxb20164502.0212002

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

徐融^{1,3}, 赵飞¹, 李怀峰², 杨新¹

(1 中国科学院光电研究院, 北京 100094)

(2 中国空间技术研究院, 北京 100094)

(3 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为了克服非分辨空间目标识别研究中外场观测和计算机仿真手段的局限性,采用实验方法模拟了天基光照场景,用仪器和技术平行类比望远镜观测时光源-目标-探测器方位,并测量了某高保真卫星模型的光谱双向反射分布函数.分析了空间目标光谱散射模型、实验场旋转轴系和环境模拟设备布局.根据在轨卫星的轨道和姿态建立了外场观测几何到室内 5 轴旋转系统的角度映射关系.利用该关系控制旋转系统实现了对某卫星过境观测的平行模拟,并对目标混合光谱进行了测量和定标.实验结果发表表明:目标光谱数据中存在“闪光”和峰值波长迁移现象;旋转系统各轴定位精度为 0.5° ,光谱数据相对测量误差为 0.018% .该方法能实现空间目标观测的全角度平行模拟,测量结果为非分辨目标外形、材料、旋转等特性的识别提供参考.

关键词:非分辨空间目标;光散射;平行实现;光谱双向反射分布函数;旋转系统

中图分类号:V556.5

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2016)02-0212002-6

Parallel Measurement of Spectral Bidirectional Reflectance Distribution Function of Non-resolved Space Objects in Laboratory

XU Rong^{1,3}, ZHAO Fei¹, LI Huai-feng², YANG Xin¹

(1 Academy of Opto-electronics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China)

(2 China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

(3 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: In order to overcome the limitations of telescopic observation and computer simulation in space object identification, experimental methods were utilized to emulate space-based illumination conditions using equipment and techniques that parallel telescopic observations and source-target-sensor orientations, while the spectral bidirectional reflectance distribution function of a high fidelity satellite model was characterized. First, the space object spectral scattering model, the axes of rotation system and equipments layout were analyzed. According to real on-orbit attitude and orbital elements of the satellite, angular relationship between the observing geometry and the five-axis rotation system were rebuilt. Finally, in the light of this relationship, parallel emulation during a satellite passage was processed, the rotation system with spectrophotometric data was measured and calibrated. Experimental results focus on luminance glint and peak wavelength drifts shown in the spectral data. The control precision of the rotation axes is 0.5° , and relative precision of spectral measurement is 0.018% . Experimental results indicate that the proposed method can realize parallel implementations of space objects observation and serve as a reference for study of shape, materials and rotation condition of non-

基金项目:国家高技术研究发展计划(No. 7042015aa6604)资助

第一作者:徐融(1991—),男,硕士研究生,主要研究方向为空间目标光谱探测与识别. Email: xurong@aoe.ac.cn

导师(通讯作者):赵飞(1978—),男,副研究员,博士,主要研究方向为空间目标光学探测与识别、光学天文技术与方法. Email: zhaofei@aoe.ac.cn

收稿日期:2015-09-06;录用日期:2015-11-18

<http://www.photon.ac.cn>

resolved space objects.

Key words: Non-resolved space objects; Light scattering; Parallel implementations; Spectral bidirectional reflectance distribution function; Rotation devices

OCIS Codes: 120.5240; 120.0280; 350.6090; 290.1483

0 引言

空间目标探测具有距离远、尺寸小、光源相对单一、亮度动态范围大、成像困难等特点,采用非分辨手段进行点目标探测识别是一项重要的研究方向^[1-3].较常见的研究途径是计算机建模仿真结合望远镜实测数据分析^[4-7].然而一方面计算机仿真难以建立精确还原空间目标光学特性的模型,仿真结果较为粗略;另一方面望远镜观测受天气、昼夜、观测角度限制严重,在目标姿态、运行状态不可知的情况下,很难对目标的真实反射特性有准确的了解.因此,用真实材料制作的高保真缩比模型在实验室平行模拟卫星的光照环境和观测几何,可测量并定标得到模型的整体光谱反射率特性,兼顾了精确性和便捷性,所测数据可以更好地支持目标识别方法的研究.

实际外场观测中,在获得目标原始光谱的同时,观测者还会拍摄多类定标帧以及光度光谱标准星,采用成熟的天文技术方法来确定大气消光、仪器响应和各类噪声,并将其从观测光谱中去除^[8].随后,再将目标光谱除以同条件拍摄的类太阳恒星光谱,得到代表目标本身材料特征的“整体光谱反射率”数据.实验室测量则可以不必再对上述实测因素进行模拟.

平行模拟实验的重点是真实观测几何和本体的姿态到实验室旋转系统的精确控制映射,并对空间光学环境进行良好的模拟.孙成明等用三维转台测量了两种卫星表面材料的光谱散射特性并尝试反演材料面积^[9].加拿大的Bedard等采用两轴旋转的方法测量了立方体工程卫星六个面的光谱双向反射分布函数(Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF)^[10].NASA的研究者利用机械臂对常见空间碎片材料及翻滚火箭残骸进行了研究^[11-12].这些研究虽能控制目标简单转动,但缺少对在轨空间目标实际观测几何的平行模拟.本文基于光谱BRDF模型和现有的3轴光学测量转台,提出了实验室平行模拟空间目标观测的方法,实验采集了高保真卫星模型光度光谱数据,研究了数据定标方法并对实验结果进行了分析.

1 空间目标光谱 BRDF 实验测量原理

空间目标本身不发光,它的亮度来自于对太阳光、地球返照太阳光以及其他星光的反射.其中太阳直射占主导地位^[13].为描述复杂空间目标对太阳光的返照特性,借鉴材料光谱BRDF模型^[14],将空间目标抽象为一个光谱BRDF等效平面.在实验室模拟过顶空间

目标的外场观测几何,测量目标的整体光谱BRDF.

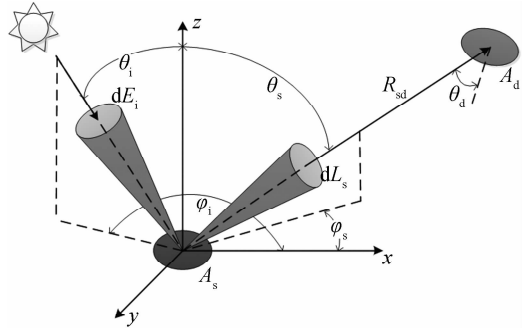


图1 BRDF定义示意图

Fig. 1 Diagram of BRDF definition

光谱BRDF定义为光谱辐射在单位面元上反射辐射亮度与入射辐照度的比值,表达式为

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s, \lambda) = \frac{dL_s(\theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s, \lambda)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i, \lambda)} \quad (1)$$

则探测器入瞳处的目标反射光通量为

$$d\psi_c(\lambda) = f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s, \lambda) \cdot dE_i(\theta_i, \varphi_i, \lambda) \cdot A_s \cdot \cos(\theta_s) \cdot \frac{A_d}{R_{sd}^2} \cdot \cos(\theta_d) \quad (2)$$

式中, θ_i, φ_i 为入射天顶角与方位角, θ_s, φ_s 为散射天顶角与方位角, λ 为波长, dL_s, dE_i 为反射辐射亮度与入射辐照度, A_s 为目标光谱BRDF等效平面, A_d 为探测器入瞳, R_{sd} 为探测距离, θ_d 为探测器偏角.

实验室平行模拟测量的目的是通过测量数据计算目标光谱BRDF.由式(1)可知,在平行模拟观测条件下,测量入射光谱辐照度 E_i 与反射光谱辐射亮度 L_s ,两者相除即得到反映目标本身光谱反射特性的光谱BRDF数据,去除了光源和探测器的影响.实验中采用白板定标法进行处理,即在相同的光照条件下测量目标模型和已知光谱反射率的朗伯体白板的反射光谱辐射亮度,进一步计算得到目标的光谱BRDF.

由光谱BRDF的定义得

$$f_{\text{ref}}(\theta_i, \varphi_i, \theta_0, \varphi_0, \lambda) = \frac{L_{\text{ref}}(\theta_i, \varphi_i, \theta_0, \varphi_0, \lambda)}{E_{\text{sun}}(\theta_i, \varphi_i, \lambda)} \quad (3)$$

$$f_{\text{sat}}(\theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s, \lambda) = \frac{L_{\text{sat}}(\theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s, \lambda)}{E_{\text{sun}}(\theta_i, \varphi_i, \lambda)} \quad (4)$$

由朗伯体定义得朗伯体反射面BRDF为

$$f(\theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s, \lambda) = \frac{\rho(\lambda)}{\pi} \quad (5)$$

将(5)代入式(3)、(4),可求得目标的光谱BRDF为

$$f_{\text{sat}}(\theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s, \lambda) = \frac{L_{\text{sat}}(\theta_i, \varphi_i, \theta_s, \varphi_s, \lambda) \cdot \rho_{\text{ref}}(\lambda)}{L_{\text{ref}}(\theta_i, \varphi_i, \theta_0, \varphi_0, \lambda) \cdot \pi} \quad (6)$$

式中, $L_{\text{ref}}, L_{\text{sat}}$ 分别为参考白板和卫星的反射光谱辐射亮

度, E_{sun} 为光源光谱辐照度, f_{ref} 、 f_{sat} 分别为白板和卫星的光谱 BRDF. θ_0 、 φ_0 为垂直测量时的天顶角和方位角, λ 为波长, ρ 为半球光谱反射率.

由光辐射原理可知,当探测距离比辐射源线度尺寸大 10 倍以上时,被测目标就可以看成点源. 因此在实验室中,虽然十几米外的探测器镜头对一米左右的目标模型所张立体角远大于实际观测中望远镜对数百公里外空间目标张开的立体角,但仍可基本反映目标辐亮度空间分布. 实际观测中常用时序光度曲线表示目标亮度随时间的变化,按照每一采样时刻真实的观测几何,实验模拟相应的入射和观测角度,所测得的目标亮度集合即可等效视为目标的光度曲线.

2 实验室布局

2.1 五轴旋转系统轴系设计

传统 BRDF 测量方法按照 BRDF 定义直接进行轴系布局,即被测样品不动,光源和探测器各由一个两轴转台控制绕中心转动,实现对 BRDF 定义中四个角度变量的模拟. 然而该方法对旋转机构的性能要求很高,且大型光源与探测设备难以移动,因此,实验室测量空间目标光谱 BRDF 需采用新的轴系布局方法.

本文所有实验数据均在某光学测量实验室获得,其主体部分包含光源、目标转台、探测器三部分. 转台系统轴系设置如图 2.

图 2 中,轴 0 为探测器绕心旋转轴,探测器绕目标模型在平面 360° 内旋转,探测器、目标、光源三者顶角

即为观测相位角. 轴 1 为目标转台底座轴,垂直于地面,转动范围为 360° ,控制卫星模型的偏航角(以下偏航角、俯仰角、滚动角皆相对于光源方向而言);轴 2 为圆弧轨道滑块绕心旋转轴,垂直于圆弧轨道平面,可进行 90° 滑动,控制卫星模型的俯仰角;轴 3 为固定在滑块上的转轴,转动范围为 360° ,控制卫星模型的滚动角. 轴 4 为卫星模型上的帆板转轴,转动范围为 360° ,控制帆板姿态. 五轴相交于卫星模型本体几何中心,即转台旋转中心点.

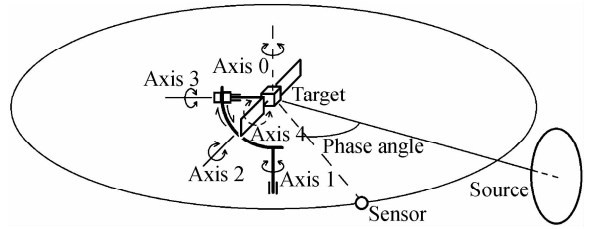


图 2 转台系统轴系图

Fig. 2 Axes of the rotation system

2.2 天基光照环境模拟

实验采用的环境模拟与测量设备见表 1. 测量时镜头距离目标 12 m, 目标尺寸约 1 m, 因此可等效外场点目标探测. 实验室四周墙壁均涂有黑色消光涂料, 转台支架也覆盖有反射率极低的黑绒布, 其可见光波段半球反射率低于 3% . 经测量, 背景辐亮度低于目标亮度 2~4 个数量级, 可见光波段总反射率低于 5% . 调整探测器测量黑斑视场, 使其恰好覆盖目标模型, 可最大程度减少背景杂散光的影响.

表 1 实验设备

Table 1 Experiment devices

Devices	Application	Device properties
Solar simulator	Providing large-diameter stable simulated solar irradiation	0.025 solar constant and 2 meters in diameter at focal plane
Three-axis turntable	Controlling satellite attitudes	Control precision of each axis is 0.5° .
Spectroradiometer	Measuring spectral radiance of the target	Measurable wavelengths from 380nm to 1080 nm, 2 nm spectral resolution
Spectral reflectance meter	Contact measuring spectral reflectance of materials	Measurable wavelengths from 400nm to 700 nm, 10 nm spectral resolution
High fidelity satellite model	Measured target	4 : 1 scaled satellite model with real space materials
Reference white board	Spectral calibration of the source	Lambertian white board

3 卫星观测几何到 5 轴旋转轴系映射

旋转系统通过从卫星本体坐标系到以光源、目标、探测器三者确定的参考坐标系的转换,可等效模拟任意卫星观测几何. 在实验室模拟中,能避免光源和探测器在空间中的上下移动,极大简化了控制复杂度. 因此,需考虑卫星本体坐标系到新的参考坐标系的角度映射关系.

如图 3(a),卫星本体坐标系 $OXYZ$, O 为卫星本体几何中心, OX 、 OY 、 OZ 三轴分别垂直于本体正面、有

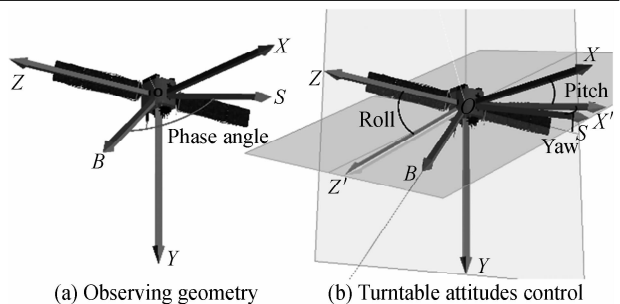


图 3 卫星观测几何与转台系统角度映射

Fig. 3 Angular relationship between

效载荷面、右侧帆板面, OS 指向光源, OB 指向探测器, 相位角即 OS 与 OB 夹角. 实验室中, 光源始终固定, 探测器在水平面内绕卫星转动, 因此以相位角所在平面考虑卫星姿态与转台各轴的角度控制映射. 如图 3 (b), 令过 OBS 三点的平面为参考平面, 卫星的姿态变化顺序为偏航角、俯仰角、滚动角, 相对应的转动轴为本体 OY 、 OZ 、 OX , 三轴旋转角度由软件计算得到: 作 OX 在参考平面上的投影 OX' , 则 OX' 与 OS 的夹角为卫星偏航角, OX' 与 OX 的夹角为卫星俯仰角. 然后作本体 YOZ 平面与参考平面相交于 OZ' , 则 OZ' 与 OZ 所成夹角为卫星滚动角. 帆板姿态控制则需约束其法线方向始终与光源方向保持最小夹角. 输入待测卫星轨道参数、测量时间、姿态控制方式等信息, 由软件计算各轴所需的旋转角度, 形成数据列表, 即可直接操作转台带动模型旋转到指定位置上, 并移动探测器到所需相位角处进行测量.

4 测量流程与实验参数设置

本文利用灵活的转台机构对观测空间目标的过程进行模拟, 采集高保真模型的光谱光度数据. 实验中首先对选定卫星的轨道和姿态进行计算机仿真. 该卫星为一颗低轨遥感卫星(轨道高度约 400 km), 卫星本体包裹有银色热控覆膜, 两翼为硅太阳能帆板. 仿真中采用该星近期的两行轨道根数, 姿态控制方式为三轴稳定对地, 太阳能帆板保持最大接收效率, 并选取了其在 2013 年 10 月 14 日 22 点(协调世界时)左右经过北京上空的一段时间作为仿真时段(考虑到大气散射与地面杂光影响, 有效观测地平角应不小于 15°). 光谱仪采集了该时段内 8 个时间点的整星模型光谱辐亮度数据, 数据点间隔为 1 min. 数据结果视为已经过标准星校正, 消除了大气消光及望远镜光学系统的影响. 实验流程见图 4.

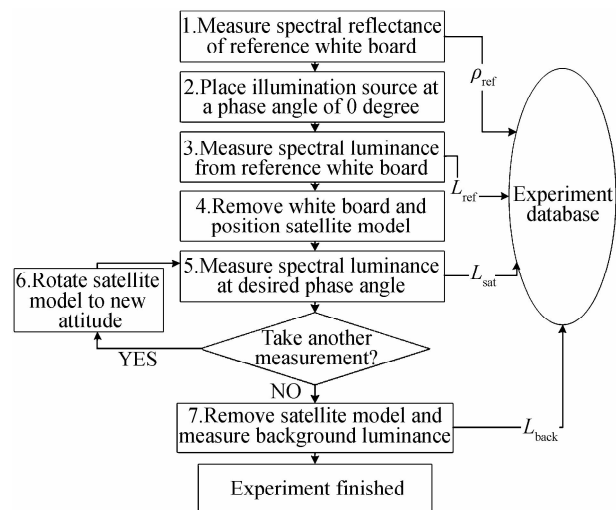


图 4 实验流程图

Fig. 4 Flow chart of experiment

查阅仪器操作手册可知仪器测量数据的误差, 由误差传递公式计算相对误差, 即

$$\frac{\Delta f_{\text{sat}}}{f_{\text{sat}}} = \frac{\Delta L_{\text{sat}}}{L_{\text{sat}}} + \frac{\Delta \rho_{\text{ref}}}{\rho_{\text{ref}}} - \frac{\Delta L_{\text{ref}}}{L_{\text{ref}}} \quad (7)$$

取第一组测量数据代入式(7)计算得 BRDF 测量相对误差为 0.018%.

5 光谱 BRDF 数据分析

5.1 常用卫星表面材料光谱分析

实验首先用半球光谱反射率计对几种常用卫星材料进行了光谱测量, 测量结果如图 5. 测量结果表明, 各种材料光谱表现出良好的平滑性. 大部分材料光谱平缓, 部分材料如多层金色聚酯膜光谱起伏显著(长波段比短波段光谱高 6 倍). 同类材料如砷化镓和硅基电池板具有相似的光谱特征(左高右低). 这些材料光谱特征的差异使得空间目标材料光谱识别成为可能.

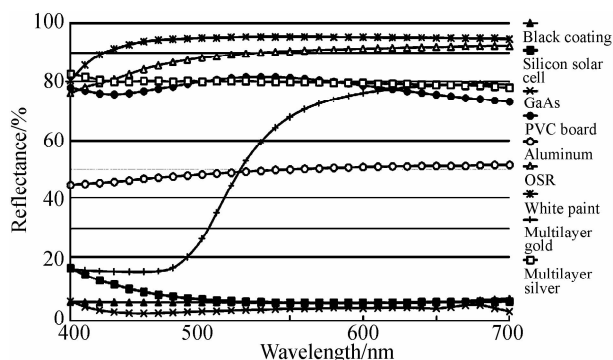


图 5 主要材料的光谱反射率

Fig. 5 Spectral reflectance of main materials

5.2 整星亮度“闪光”

将实验测量数据代入式(6), 得到定标后的 8 组光谱 BRDF 数据如图 6.

由图 6 可见, 各采样点得到的光谱数据在可见光波段内都较为平缓, 总体呈银白色. 这是由于模型本体表面主要由多层银色聚酯膜、航天铝板和白漆组成, 而它们的光谱形状在可见光波段都没有较大起伏(见图 5). 观察 8 组数据的变化趋势, 发现随着时间推移, 相位角增大, 模型亮度逐渐减弱, 而仅在 22:11 时刻附近, 其亮度突然增大到前一时刻的 6 倍左右, 且光谱形状发生了较大改变, 称为一次“闪光”. 这是由于卫星模型底部的银色柱状天线阵列在该角度发生镜面反射所致, 而这些天线的视面积不足整个卫星模型视面积的 5%. 由此看来, 即使是卫星上较小的部件, 一旦发生镜面反射, 也将对整星亮度及光谱产生巨大影响. 在数据处理中, 该现象一方面可以作为目标识别中的特征点, 另一方面在长时间光度变化建模中需当做异常值剔除.

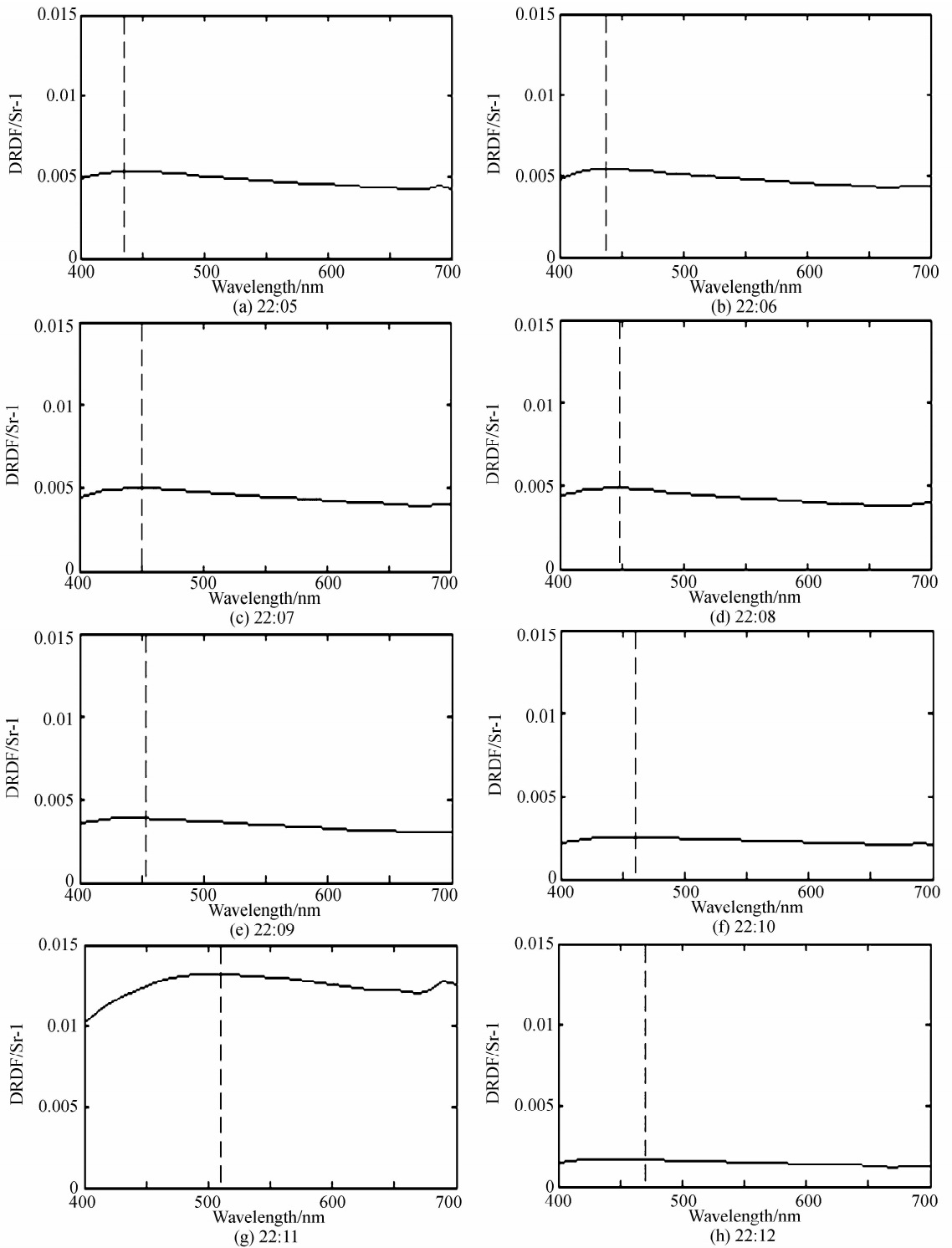


图6 各时间点定标光谱 BRDF 数据

Fig. 6 Calibrated spectral BRDF

5.3 峰值波长迁移

由软件仿真计算,该时段内目标观测相位角由 53.55° 逐渐增大到 113.14° 。由图 5 可见,太阳能帆板本身的光谱反射率较低,在大相位角下“蓝色的”太阳能帆板的反射光谱能量和本体“银色的”反射光谱能量更相比显得十分微弱,在光谱曲线(图 6)中难以察觉。然而仔细观察数据发现,随着时间推移,即相位角变

大,光谱曲线的左侧峰值波长逐渐右移,从 435 nm 逐渐增大到 465 nm。而到发生“闪光”时,峰值波长突增至 510 nm,随后回移,过程如图 6、7 中虚线所示。

该峰值波长迁移现象可解释为随着相位角逐渐增大,太阳能帆板光谱成分在整体光谱中占据的比例越来越小,而卫星本体由于多面的结构和较高的反射率,亮度减弱速度相比帆板更慢,所以其光谱成分比例反

而相对增加,整体光谱越来越趋近于卫星本体材料的“银白色”叠加光谱。

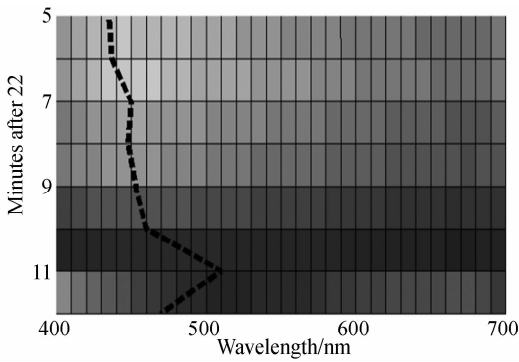


图7 峰值波长迁移

Fig. 7 Peak wavelength drifts

6 结论

本文实验采用了真实的卫星轨道参数、姿态控制、观测几何,利用航天材料制作的高保真卫星模型进行了平行模拟观测,给出了卫星在轨姿态与观测几何到实验室平行模拟的角度映射方法和操作实例.实验结果表明旋转系统各轴定位精度为 0.5° ,光谱BRDF测量相对误差为 0.018% .实验中观察到了卫星“闪光”(亮度增大6倍),表明卫星上微小细节发生镜面反射时对整个光度光谱产生巨大影响.材料视面积变化造成光谱峰值波长的迁移,随相位角增大,峰值波长向长波段迁移约30 nm.

实验过程中各取样点的卫星姿态和探测器位置都需手动反复调节,故数据采集效率较低.因此对于今后大量数据采集需求,全自动化的电控转台系统是未来更高精度测量研究的基础.光度光谱分析是非分辨目标识别中的重要手段,下一步将着重研究“闪光”现象对目标整体光度的影响和用于特征识别的方法,以及波长迁移等光谱形状变化与目标本身姿态变化的关系.

参考文献

[1] TANG Yi-jun, JIANG Xiao-jun, WEI Jian-yan, *et al.* Review of optical observations of high apogee space debris [J]. *Journal of Astronautics*, 2008, **29**(4): 1094-1098. 唐铁峻, 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.

[2] SEITZER P, BARKER E S, COWARDIN H, *et al.* Bi-static optical observations of GEO objects [C]. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2014.

[3] BÉDARD D, WADE G, JOLLEY A. Interpretation of spectrometric measurements of active geostationary satellites [C]. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2014.

[4] SHU Rui. Research on satellite target identification and feature extraction method [D]. Harbin Institute of Technology, 2010. 舒锐. 卫星目标识别与特征参数提取方法研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2010.

[5] MURRAY-KREZAN J, INBODY W C, DAO P, *et al.* Algorithms for automated characterization of three-axis stabilized GEOS using non-resolved optical observations[R]. Air Force Research Lab Kirtland Afb Nm Space Vehicles Directorate, 2012.

[6] TANG Yi-jun, JIANG Xiao-jun, WANG Jian-feng, *et al.* Diffuse reflection optical characteristics of three-axis stabilization GEO satellite [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(11): 2863-2866. 唐铁峻, 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.

[7] ZHANG Wei, WANG Hong-yuan, WANG Zhi-le, *et al.* Modeling method for visible scattering properties of space target [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, **37**(12): 2462-2467. 张伟, 汪洪源, 王治乐, 等. 空间目标可见光散射特性建模方法研究[J]. *光子学报*, 2008, **37**(12): 2462-2467.

[8] NISHIMOTO D L, AFRICANO J L, SYDNEY P F, *et al.* Spectroscopic observations of space objects and phenomena using Spica and Kala at AMOS[C]. International Symposium on Optical Science and Technology International Society for Optics and Photonics, 2001: 212-220.

[9] SUN Cheng-ming, ZHAO Fei, YUAN Yan. Feature extraction and recognition of non-resolved space object from space-based spectral data [J]. *Acta Physica Sinica*, 2015, **64**(3): 034202. 孙成明, 赵飞, 袁艳. 基于光谱的天基空间点目标特征提取与识别[J]. *物理学报*, 2015, **64**(3): 034202.

[10] BÉDARD D, LÉVESQUE M, WALLACE B. Measurement of the photometric and spectral BRDF of small Canadian satellites in a controlled environment[C]. Proceedings of the Advanced Maui optical and space surveillance technologies conference, Hawaii, USA, 2011: 1-10.

[11] COWARDIN H, SEITZER P, ABERCROMBY K, *et al.* Characterization of orbital debris photometric properties derived from laboratory-based measurements [C]. 2010 AMOS Technical Conference, Maui, HI, 2010.

[12] COWARDIN H, OJAKANGAS G, MULROONEY M, *et al.* Optical signature analysis of tumbling rocket bodies via laboratory measurements [C]. Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference, 2012, **1**: 61.

[13] XIAO Xiang-guo, WANG Zhong-hou, BAI Jia-guang, *et al.* Influence of earth radiation on photoelectric detection system based on space [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(2): 375-381. 肖相国, 王忠厚, 白加光, 等. 地表反照对天基测量相机的影响[J]. *光子学报*, 2009, **38**(2): 375-381.

[14] YUAN Yan, SUN Cheng-ming, ZHANG Xiu-bao. Measuring and modeling the spectral bidirectional reflection distribution function of space target's surface material [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010 (3): 2097-2103. 袁艳, 孙成明, 张修宝. 空间目标表面材料光谱双向反射分布函数测量与建模[J]. *物理学报*, 2010 (3): 2097-2103.

[15] LIU Mei-ying, WANG Hu, WEN De-sheng, *et al.* Celestial positioning method and observation analysis for space object [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **11**(11): 1112005. 刘美莹, 王虎, 汶德胜, 等. 空间目标天文定位方法及观测分析[J]. *光子学报*, 2014, **11**(11): 1112005.