

## 空间目标多种光谱观测方法的应用研究

邓诗宇<sup>1,2</sup>, 刘承志<sup>1,4\*</sup>, 谭勇<sup>3\*\*</sup>, 刘德龙<sup>1</sup>, 姜春旭<sup>3</sup>, 康喆<sup>1</sup>, 李振伟<sup>1</sup>, 范存波<sup>1,4</sup>, 朱成伟<sup>1</sup>, 张楠<sup>1</sup>,  
陈龙<sup>1,2</sup>, 牛炳力<sup>1,2</sup>, 吕众<sup>3</sup>

<sup>1</sup>中国科学院国家天文台长春人造卫星观测站, 吉林 长春 130117;

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049;

<sup>3</sup>长春理工大学理学院, 吉林 长春 130022;

<sup>4</sup>中国科学院空间目标与碎片观测重点实验室, 江苏 南京 210008

**摘要** 光谱观测技术作为空间目标特征信息获取的一种方式, 为空间目标表面材料的识别与性能分析提供了重要的解决方法。目前, 光学信息采集元件的精密化程度高, 因此空间目标观测技术也呈现多样性。基于长春人造卫星观测站 1.2 m 空间目标光学望远镜, 联合推扫式光栅光谱仪、光纤光谱仪、滤波器光谱相机三种终端设备, 分别对恒星与空间目标开展观测并获取光谱数据; 进一步, 通过数据对观测技术进行适应性分析。结果表明: 三种方法均适用于恒星和高轨道空间目标的观测, 可得到较好的光谱数据; 滤波器光谱相机、光纤光谱仪适用于观测低轨道空间目标; 而推扫式光栅光谱仪、滤波器光谱相机适用于观测中轨道空间目标。此外, 滤波器光谱相机还可为精眼型空间目标光谱数据的获取提供观测参考。对于不同应用环境, 对终端成本、光路调试复杂程度、获取光强度、可调整观测波段、数据处理复杂程度的对比分析可作为后续方案的参考。

**关键词** 光谱学; 光栅; 光纤组件; 望远镜; 光学设备; 光谱分析仪

中图分类号 P171.3

文献标志码 A

doi: 10.3788/LOP202158.2230001

## Application of Multiple Spectral Observation Methods of Space Targets

Deng Shiyu<sup>1,2</sup>, Liu Chengzhi<sup>1,4\*</sup>, Tan Yong<sup>3\*\*</sup>, Liu Delong<sup>1</sup>, Jiang Chunxu<sup>3</sup>, Kang Zhe<sup>1</sup>,  
Li Zhenwei<sup>1</sup>, Fun Cunbo<sup>1,4</sup>, Zhu Chengwei<sup>1</sup>, Zhang Nan<sup>1</sup>, Chen Long<sup>1,2</sup>, Niu Bingli<sup>1,2</sup>,  
Lü Zhong<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Changchun Observatory, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Changchun, Jilin 130117, China;

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;

<sup>3</sup>School of Science, Changchun University of Science and Technology, Changchun, Jilin 130022, China;

<sup>4</sup>Key Laboratory of Space Object & Debris Observation, Chinese Academy of Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, China

**Abstract** As a way to obtain the feature information of space targets, the spectral observation technology provides an important solution for the identification and performance analysis of the surface materials of space targets. At present, the degree of precision of optical information collection components is high, so the space target observation technology also shows diversity. Based on the 1.2 m space target optical telescope at the Changchun Satellite Observatory, three terminal devices of the push-broom grating spectrometer, the optical fiber spectrometer, and the filter spectrometer camera are used to observe stars and space targets and thus spectral data are obtained. Further, the adaptive analysis of the observation technology is conducted through the data. The results show that the three

收稿日期: 2020-11-24; 修回日期: 2020-12-03; 录用日期: 2021-02-01

基金项目: 国家自然科学基金(U1731240, U2031129, 12003052)

通信作者: \*lcz@cho.ac.cn; \*\*laser95111@126.com

methods are all suitable for the observation of stars and high-orbit space targets, and can obtain better spectral data. In contrast, the filter spectroscopic cameras and the fiber spectrometers are suitable for observing the low-orbit space targets, however the push-broom grating spectrometers and the filter spectroscopic cameras are suitable for observing the medium-orbit space targets. In addition, the filter spectroscopic cameras can provide an observation reference for the acquisition of spectral data of precision-tracked space targets. For different application environments, the equipment cost, the optical path debugging degree, the obtained light intensity, the adjustable observation band, and the degree of data processing can be used as a reference for subsequent programs.

**Key words** spectroscopy; gratings; fiber components; telescopes; optical devices; spectrometers

**OCIS codes** 300.6190; 050.2770; 060.2340; 230.3990

## 1 引言

在天文与航天领域,主要利用光学望远镜和终端设备对空间目标进行光学观测。光学望远镜可视作终端的镜头,因其强大的收集光的能力,可获取空间目标微弱的光学信号。不同的终端设备对不同的信号在不同观测条件下会产生不同的观测效果。目前,在已知的空间目标观测方法中,光谱终端设备使用比较广泛,因其与传统的定轨观测兼容,故可为人们提供高维的光学信息,也是空间态势感知的重要研究课题。

随着光学观测仪器性能的逐步提高,多种空间目标的光谱观测方法被用于科学研究和常规观测。2017年, Vananti 等<sup>[1]</sup>首次利用特内里费岛欧洲空间局空间碎片望远镜(ESASDT)对高轨道物体进行了低分辨率光谱观测,得到了不同轨道、不同面积质量比(AMR)的卫星及空间碎片(物体)的反射谱。在不同相角下,自旋稳定的和三轴稳定的高轨道卫星的观测结果表明,前者可用表面为均匀反射面的圆柱体来模拟,后者可将目标近似为箱翼模型。在此基础上,我们归纳了箱和翼的光谱特性。本文对不同光谱形状的三种目标进行了初步分类:第一类为谱线单调递增,呈凹线形状;第二类为谱线单调递增,呈凸形;第三类为谱线相对平坦,蓝端可能出现负斜率。其中,第一类谱线目标可能受到宇宙“红化效益”的影响。在观测中,一些物体出现两种不同的光谱,表明其主要具有两个性质不同的反射面。通过对比两个高 AMR 的空间碎片,发现其谱线形状与颜色指数相关,并可用三类目标分类法加以解释。

与国外相比,国内相关的工作多集中于实验室模拟与算法研究。近年来,随着我国综合科研实力的提高,空间目标观测研究取得了一些成果。例如,仇国庆等<sup>[2]</sup>提出一种基于视觉特征融合的机载红外弱小目标检测方法,利用拉普拉斯算法增强像素强度,在真实目标与疑似目标中采用局部多向梯度方

法抑制复杂背景和强杂波,并使用局部灰度差方法增强目标,利用视觉特征信息图像实现与目标精准检测的融合。又如,曾海瑞等<sup>[3]</sup>根据空间目标的星空背景特点,提出一种基于相机阵列的高动态范围图像合成方法;基于相机阵列系统,获取同一区域的不同曝光图像并将恒星质心作为控制点,实现了多相机成像配准;同时,结合各相机间的标定及其逆响应函数,设计了权重函数并将不同曝光图像匹配合成一幅高动态图像。再如,考虑到卫星的光学散射特性因其表面褶皱而会受到影响,张峰等<sup>[4]</sup>通过对空间目标褶皱表面的模拟,计算了不同入射角、观测角时目标的光学横截面积,进而研究了不同褶皱情况对目标光学散射特性的影响。此外,南京理工大学的韩玉阁等<sup>[5]</sup>通过红外辐射技术对忙时和闲时卫星进行了区分,合肥工业大学的黄涛等<sup>[6]</sup>通过激光观测获取了空间碎片轨道数据及其外部形状等参数,哈尔滨工业大学的王付刚等<sup>[7]</sup>证实了空间目标多谱段光学特征与运动姿态之间存在关联。

本文利用三种方法分别进行了空间目标光谱观测,首先开展设备联调、获取数据、分析数据等实验,进而确定三种方法的应用范围,通过在空间目标观测中制定方法和选型来降低成本并提高效率,从而为进一步获取更高质量空间目标光谱数据积累经验。

## 2 光学望远镜介绍

本文基于长春人造卫星观测站 1.2 m 大口径空间目标光电望远镜开展相关研究工作。该望远镜位于吉林省吉林市大绥河镇吉林空间目标观测基地,基地常年大气透过率与年平均视宁度较高、观测环境干扰光及天光背景较弱。天顶附近以及仰角 45°以上的天光亮度较好,非常适合开展空间目标的实地观测。光学望远镜由 1.2 m 大口径光学系统、望远镜电控伺服系统、望远镜导星镜系统组成,其整体结构如图 1 所示,相关参数如表 1 所示。

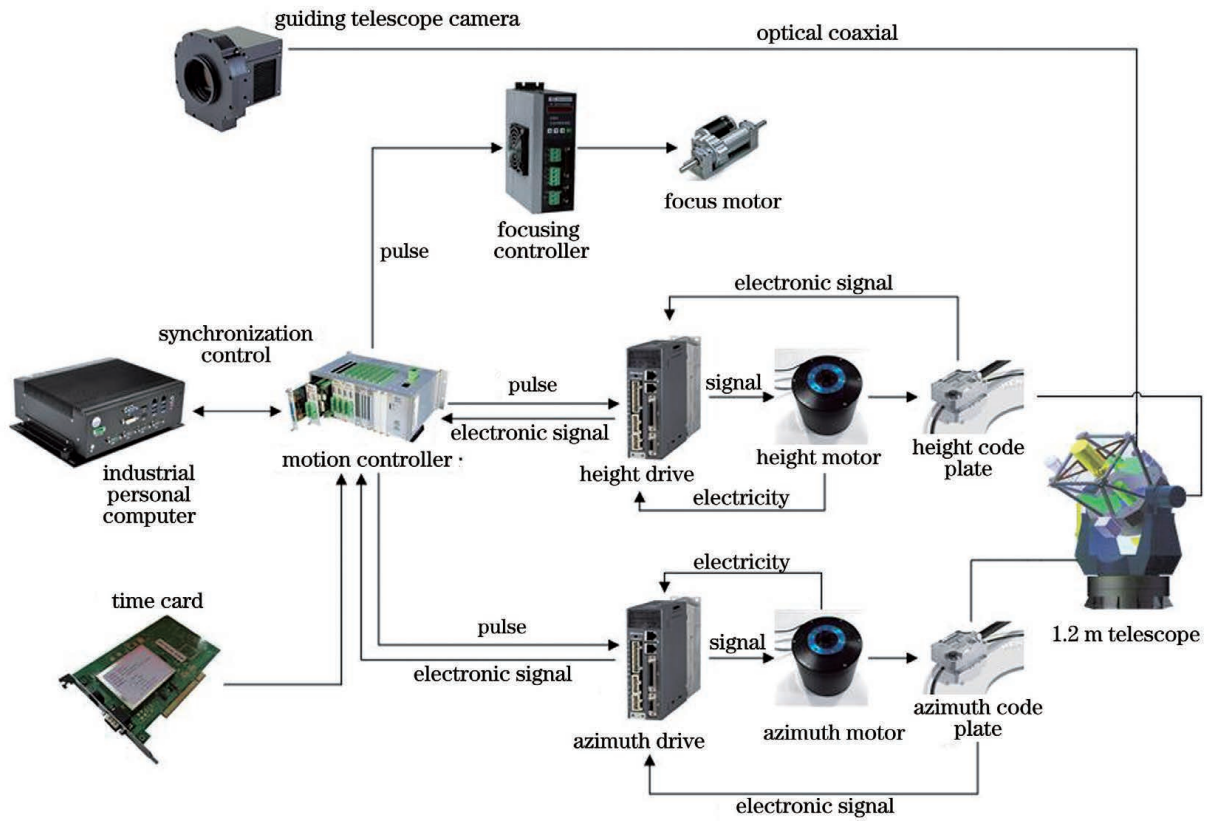


图 1 光学望远镜整体示意图

Fig. 1 Overall schematic of optical telescope

表 1 1.2 m 大口径空间目标光学望远镜参数

Table 1 Technical parameters of 1.2 m large-aperture spatial optical telescope

Parameter	Content
Aperture size	$\geq 1200$ mm
Prime focus	Focal length $> 2000$ mm, field $\geq 1.5^\circ \times 1.5^\circ$ , efficiency $\geq 70\%$
Cassegrain focus	Focal length $< 9195$ mm, field $\geq 11' \times 11'$ , efficiency $\geq 70\%$
Tracking speed	Azimuth velocity $\geq 6^\circ/s$ , altitude speed $\geq 2^\circ/s$ , acceleration $\geq 1^\circ/s^2$
Tracking accuracy	$0.2''/10$ s for star, and $\sim 5''$ for space target
Pointing accuracy	$\leq 5''$
Axis rotation range	Position: $\pm 270^\circ$ Altitude: $0-95^\circ$

该望远镜属于地平式构造,具有指向精度高、结构紧凑、重力变形简单等优点。望远镜采用桁架结构,确保在不同风力条件下系统依旧可以稳定使用;采用力矩电机直驱获得较宽的转速范围;为了保证连续运行的稳定性和轴系的输出精度,望远镜配备了多读数头的高精度金属反射式光栅编码器。为了探测暗弱目标,我们优化了望远镜的跟踪精度,目前该望远镜的正弦极限测试已达到优于  $5''$  的指标,如图 2 所示。

光谱实验的开展主要利用该光学望远镜的卡塞格林焦点(简称:卡焦)系统,其主要优点为横向放大率高并为终端提供较为充分的空间,适合对目标进行精细研究。但其视场较小(例如 1.2 m 大口径望远镜的视场为  $11'$ ),不利于目标的搜寻与定位,因此需要在光路平行的基础上添加导星系统。本平台导星系统由 12 inch(1 inch = 2.54 cm)口径商用望远镜搭载科研级高速(sCMOS)相机组成,配置如表 2 所示,其中 f/8 表示光圈为 8.0, f/5 表示光圈为 5.0。

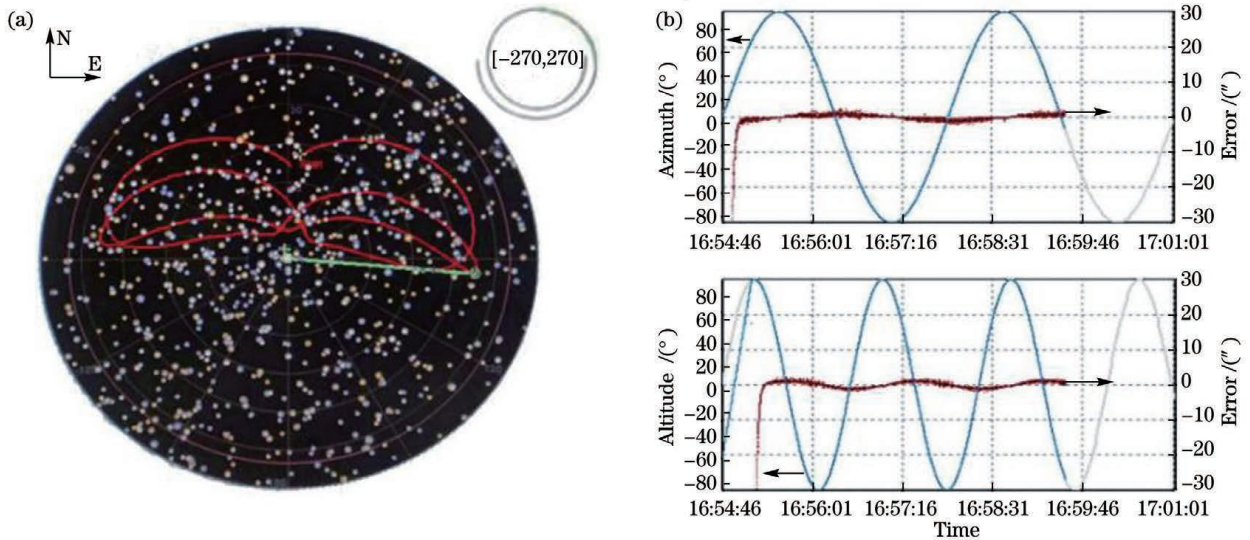


图 2 1.2 m 大口径望远镜的正弦测试。(a) 望远镜指向路径:曲线表示望远镜运行轨迹,直线表示望远镜指向目标;  
(b) 望远镜跟踪结果

Fig. 2 Limitation test of 1.2 m large-aperture optical telescope. (a) Pointing path of telescope with curve indicating trajectory and straight line indicating pointing target of telescope; (b) tracking results of telescope

表 2 导星系统的配置

Table 2 Configuration list of guiding system

Element	Type	Manufacturer	Technical index
Guiding scope	LX800 ACF	Meade	Optical design: RC foldback system with aspheric correction mirror Aperture size: 12 inch Focal length: 2438 mm, f/8 Resolution: 0.38"
			Primary /secondary mirror material: low elongation borosilicate glass Correction mirror material: broad-spectrum high-transparency borosilicate float glass Optical coating: ultra high temperature ceramics Part: f/5zoom Typical narrow field of view with zoom: 57.2' × 45.8'
Camera	KL4040	FLI	Photosensitive chip: sCMOS Photosensitive method: front illuminated Number of pixels: 4096 × 4096 Pixel size: 9 μm × 9 μm Chip size: 52.1 mm Full well electron: 7e <sup>-</sup> × 10 <sup>4</sup> Maximum transmission frequency: 24 frame/s Maximum readout noise: 3.7e <sup>-</sup> Highest quantum efficiency: 74% Wind cooling temperature: at least 40 °C Dark current: 0.15e <sup>-</sup> @ -20 °C

### 3 光谱探测终端方法

分别利用三种光谱观测终端开展光谱观测研究:

方法一为单狭缝光栅光谱仪,方法二为光纤与光谱仪组合,方法三为滤波器与光谱相机组合。我们将分别给出实施方法状态、光谱数据情况以及性能评价内容。



### 3.1 方法一 (Project 1)

方法一根据光栅光谱仪光学原理,将成分复杂的光分解为光谱线,进而进行光谱分析,原理示意图如图 3 所示,其中 M1 为反射镜, M2 为准光镜, M3 为物镜, G 为平面衍射光栅, S1 为入射狭缝, S2 为光电倍增管接收, S3 为观察口。

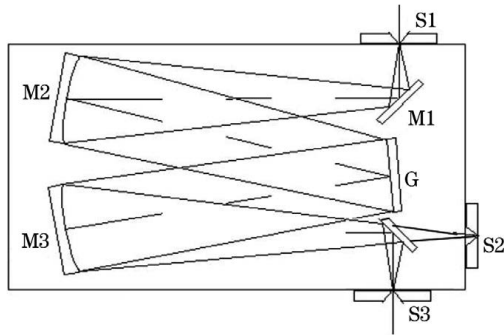


图 3 光栅光谱仪光学原理图

Fig. 3 Optical schematic of grating spectrometer

采用的型号为 FER-SCI-BRX 的外接光谱仪 (Princeton Instruments) 如图 4 所示,其分辨率为 0.20~0.24 nm、波长范围为 190~1100 nm,外形尺寸为 26.8 cm×18 cm×21 cm。自主研制了方便固定与拆修的望远镜末端,通过横向控制的机械结构,实现了 FER-SCI-BRX 光谱仪狭缝在一维方向上进行速度可控性推扫。首先,通过导星镜找到空间目标方

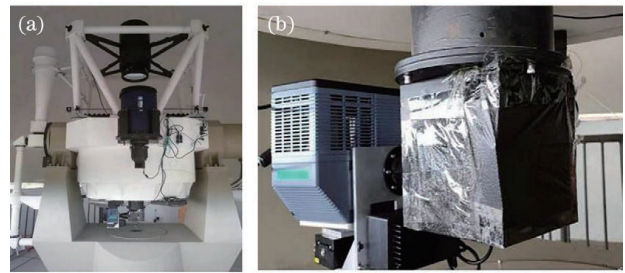


图 4 单狭缝光栅光谱仪终端与望远镜组合示意图。

(a) 设备组装图; (b) 搭载于望远镜卡焦系统的单狭缝光栅光谱仪

Fig. 4 Diagram of telescope with single-slit grating spectrometer. (a) Schematic of equipment assembly; (b) single-slit grating spectrometer mounted on optical telescope focus system

位,调节望远镜使空间目标位于终端视场中心位置,以便对光谱观测终端进行调节;其次,细微调试光谱终端焦距,同时装载狭缝进行推扫,获取空间目标光谱数据;最后,通过粗略扫描确定空间目标光谱的中心频率,再通过精细扫描得到高分辨率的光谱数据。

利用方法一对恒星及高轨、中轨、低轨空间目标进行观测,至少观测两个完整的观测周期。通过终端仪器直接获取观测数据,获取了多组恒星光谱且数据比较理想,但空间目标数据较差,恒星 1 北极星的星等为 1.97,如图 5 所示;恒星 2 的星等为 5.80,

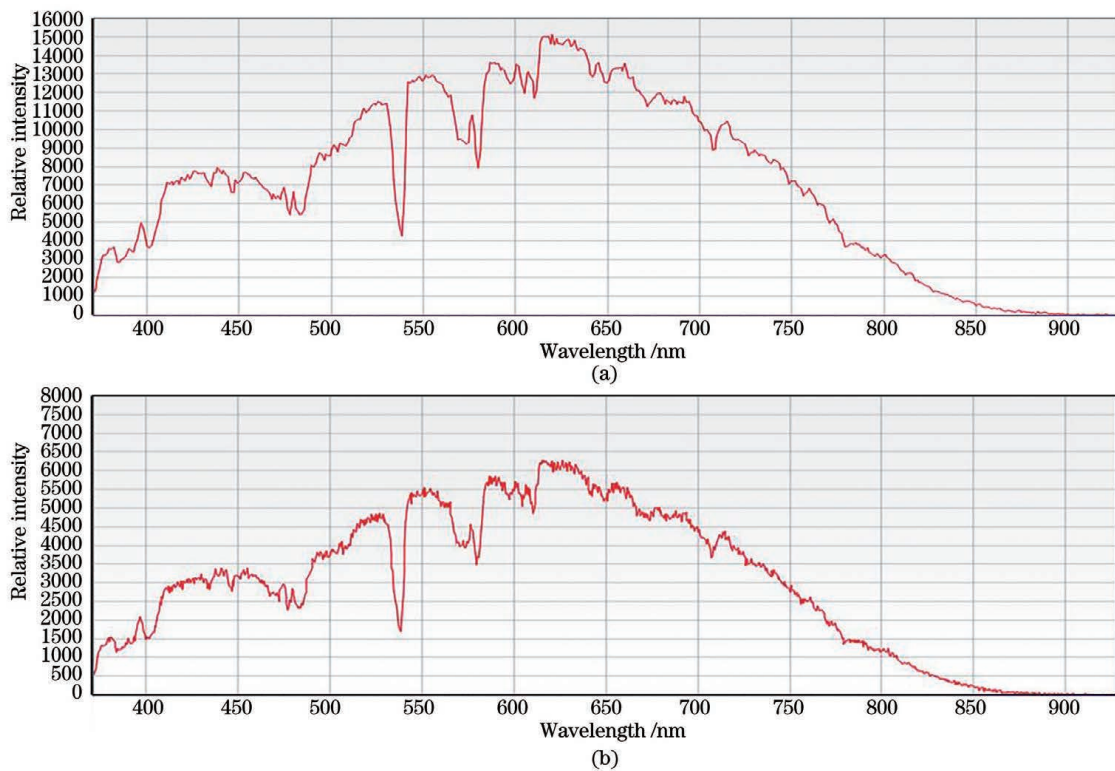


图 5 方法一得到的北极星光谱。(a)第一次观测;(b)第二次观测

Fig. 5 Polaris spectra obtained by method one. (a) First observation; (c) second observation

如图 6 所示。其中,北极星数据与 LAMOST DR6 数据库中 F8 型恒星图谱对比,相识度非常高。

综合光学原理与实际测量情况,方法一在恒星、高轨道空间目标、中轨道空间目标光谱测量中效果

更好。根据两次北极星恒星光谱数据对比结果,可知数据波动差异相对稳定,无较大波动,观测数据误差主要是由观测地点上空大气扰动的环境因素引起的,其次是由设定时间间隔的人为因素导致。

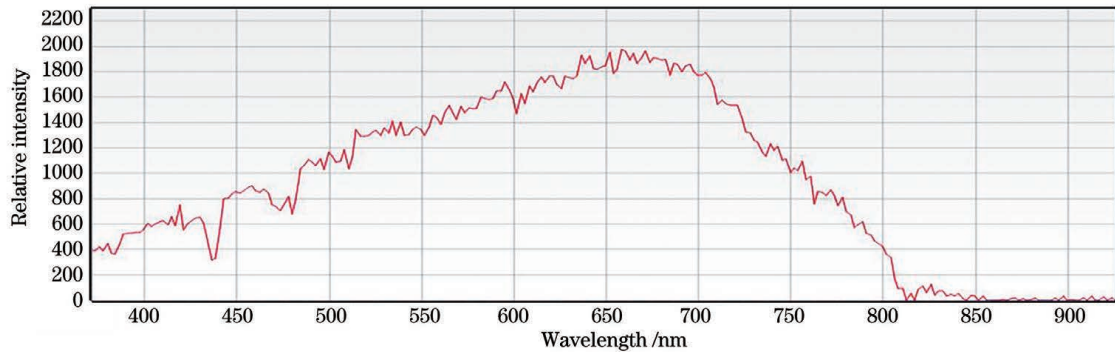


图 6 5.80 星等恒星的光谱谱线

Fig. 6 Spectrum of 5.80 magnitude star

### 3.2 方法二 (Project 2)

方法二根据光纤光谱仪光学原理,采用光纤作为信号耦合器件,将被测光耦合到光谱仪中进行光谱分析,原理示意图如图 7 所示,其中 M1 为准直镜, M2 为成像镜, G 为平面衍射光栅, S1 为入射狭缝。

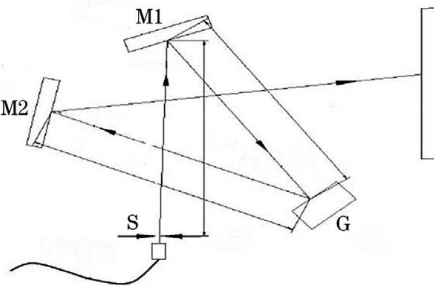


图 7 光纤光谱仪光学原理图

Fig. 7 Optical schematic of fiber spectrometer

光纤准直镜(型号为 84UV,兼容孔径为  $0.22 \sim 0.37NA$ ,  $NA$  为数值孔径)位于望远镜终端箱,收集光信号并将信号通过 30 m 铠甲光纤传输至控制室中的光纤光谱仪(Ocean Optics QE65 Pro)中,如图 8 所示。光谱仪经 USB 3.0 协议端口与数据处理计算机通信。首先,将望远镜对准北极星,将光纤耦合调节至最佳状态,采集光谱数据;其次,在星表库中找寻几个不同星等恒星(避开月光干扰),控制望远镜,细微调节光纤准直镜,直至最佳耦合状态;最后,选取地球静止轨道(GEO)空间目标作为探测对象,微调光谱,谨慎选择光谱仪积分时间,记录其光谱。GEO 目标相对于望远镜移动速度较慢,方便精细调整光纤光路。

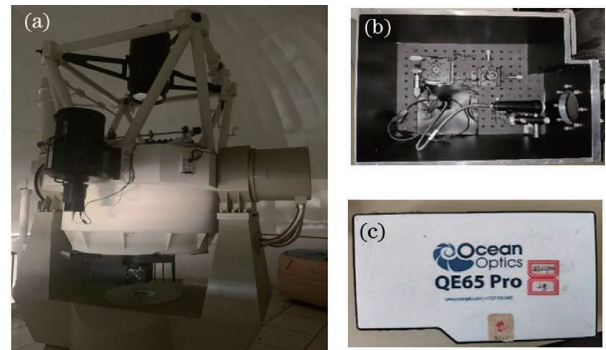


图 8 光纤光谱仪终端与望远镜组合示意图。(a) 设备组装图;(b) 准直镜进入铠甲光纤的终端盒;(c) 光谱仪正面

Fig. 8 Diagram of telescope with optical fiber spectrometer. (a) Schematic of equipment assembly; (b) terminal box with optical fiber through collimator; (c) front side of spectrometer

利用方法二对恒星及高轨、中轨、低轨空间目标进行观测,至少观测两个完整的观测周期。通过终端仪器直接获取观测数据,对于同一恒星或目标,采用不同曝光时间,获得其最佳光谱数据。北极星光谱数据如图 9 所示。恒星 1 的星等为 5.00,恒星 2 的星等为 6.02,恒星 3 的星等为 7.02,恒星 4 的星等为 8.00,光谱数据如图 10 所示。将以上 5 个星等与 LAMOST DR6 数据库中的恒星图谱进行对比,相识度非常高。结果显示,该方法观测噪声偏大,观测强度只能下探到 8 等恒星。

综合光学原理与实际测量情况,可以看出,方法二在恒星、高轨道空间目标、低轨道空间目标光谱测量中效果更好。根据两次北极星、不同星等恒星光谱数据对比结果,可知数据波动差异相对稳定,无较

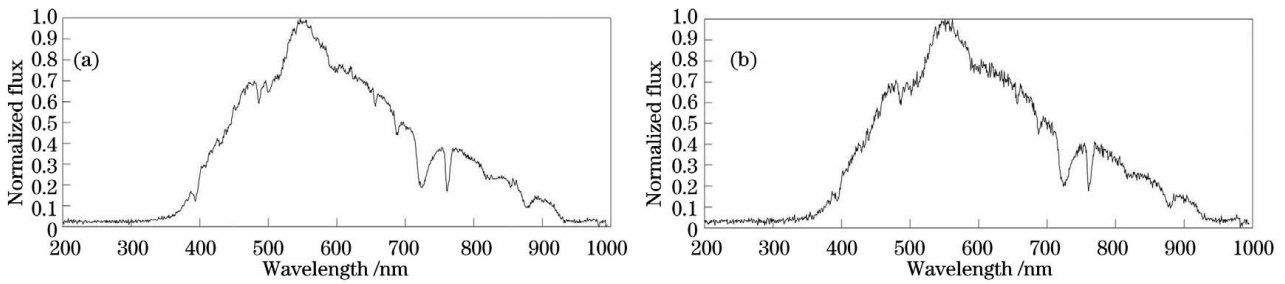


图 9 方法二得到的北极星光谱。(a)第一轮;(b)第二轮

Fig. 9 Polaris spectra obtained by method two. (a) First round; (b) second round

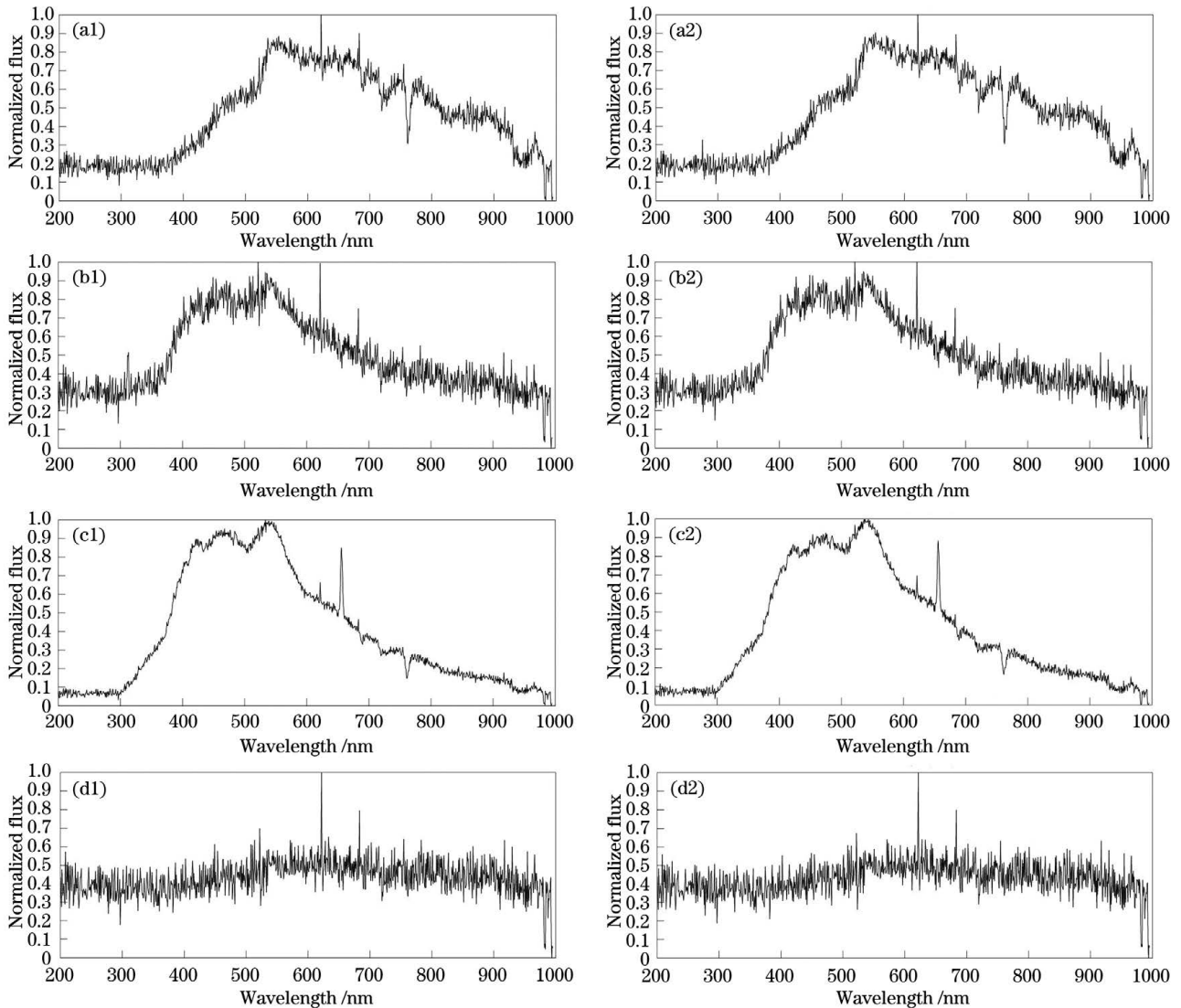


图 10 不同星等恒星的观测光谱数据。(a1)(a2)5 星等;(b1)(b2)6 星等;(c1)(c2)7 星等;(d1)(d2)8 星等

Fig. 10 Measured spectra of stars with different magnitudes. (a1)(a2) 5 magnitude; (b1)(b2) 6 magnitude; (c1)(c2) 7 magnitude; (d1)(d2) 8 magnitude

大波动,观测数据误差主要是由观测地点上空大气扰动的环境因素引起的,其次是由调节光纤与光谱仪耦合状态的人为因素导致。

### 3.3 方法三(Project 3)

方法三根据液晶可调滤波器的 sCMOS 相机成

像光谱仪光学原理,利用单色面阵探测器来获取待测物体在某一窄带波段中的整幅图像,然后依次改变窄带波段频率,并采集相应的图像,将各窄带波段下采集得到的图像组合起来即可得到光谱图像。原理示意图如图 11 所示。



采用液晶可调滤波器(Liquid Crystal Tunable Filter, LCTF, 型号为 CRi VariSpec-10 51997)与 sCMOS 相机(型号为 HAMAMATSU ORCA-flash4.0 V3)联用, 获得不同选通波长的目标图像, 然后采用孔径测光的方法得到不同波长处星象的亮度。该方法测得的目标光谱的波长分辨率和波段范围由 LCTF 和 sCMOS 相机决定, 注意保持二者工作时间同步。为确保 LCTF 处在 15 °C 以上的工作环境, 我们为其搭载了自制的恒温陶瓷加热片。设备组装示意图与设备图如图 12 所示, 设备参数如表 3 所示。

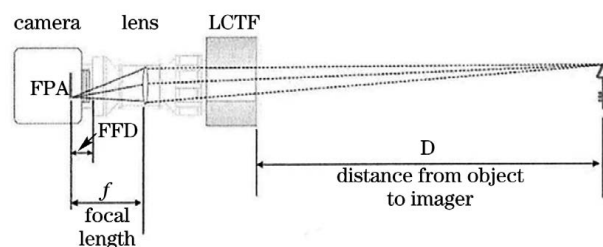


图 11 液晶可调滤波器的 sCMOS 相机成像光谱仪的光学原理图

Fig. 11 Optical schematic diagram of sCMOS camera imaging spectrometer with liquid crystal tunable filter

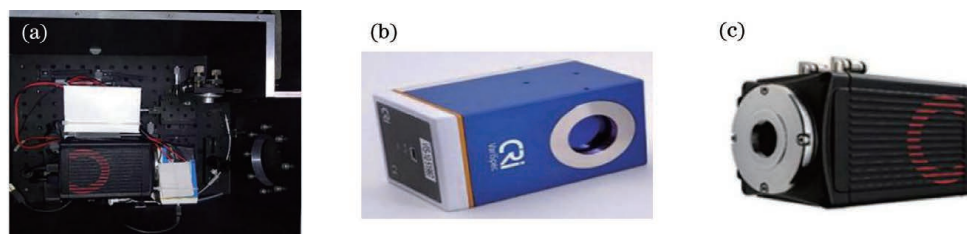


图 12 滤波器光谱相机。(a)设备组装图;(b)液晶可调滤波器;(c)sCMOS 相机

Fig. 12 Filter spectrometer camera. (a) Schematic of equipment assembly; (b) liquid crystal tunable filter; (c) sCMOS camera

表 3 设备参数

Table 3 Equipment parameters

Instrument	Manufacturer	Technical index
LCTF	CRi	Spectral range: 400–720 nm
		Bandwidth(full width at half maximum): 10 nm
		Minimum jump spectral width: 1 nm
		Minimum jump time: 50 ms
		Operating temperature: 10–40 °C
		Instrument size: 3.36 inch×1.95 inch×2.01 inch
		Field of view: 7.5° half-angle
		Maximum amount of light: 500 mW/cm <sup>2</sup>
		Caliber size: 35 mm
		Resolution: 2048×2048
Camera	HAMAMATSU	Pixel area: 6.5 μm×6.5 μm
		Peak quantum efficiency: 82% @ 560 nm
		Readout noise: 1.0 median
		Bit depth: 16 bit
		Maximum frame rate: 40 frame/s
Ceramic thermostat	Homemade	Temperature control range: -5–80 °C
		Direct voltage: 24 V
		Power consumption: 120 W



利用方法三对恒星及高轨、中轨、低轨空间目标进行观测,至少观测两个完整的观测周期。首先,操控望远镜指向高感兴趣的轨道空间目标,使其处于相对静止状态,方便细微调整光路,以获取更多的光强度信息;将 LCTF、sCMOS 相机、陶瓷加热片分别通过 USB 协议端口经 30 m 中继连接至控制室,设置 LCTF 翻转步长和时间、sCMOS 相机的曝光时间,并确保二者同步。

将拍摄图像保存在控制计算机中,并采取事后分析:经过图像还原(Frame Reduction),运用图像采集软件得到高光谱数据图像;孔径测光(Aperture Photometry),应用天文学方法 IRAF (Image Reduction and Analysis Facility) 及其运行平台得到一维光谱数据;光度校准 (Magnitude Calibration),使用去除太阳、大气、传函仪器的光谱数据<sup>[8]</sup>,得出空间目标本征光谱数据。北极星光谱

数据如图 13 所示。某目标在 400, 435, 475, 515, 555, 595, 635, 675, 720 nm 波长处的图像如图 14 所示,经测光分析,该目标一维光谱数据如图 15 所示。其在 400 ~ 720 nm 范围内两个周期的观测光谱数据如图 16 所示,可见该方法能反映目标的特性。

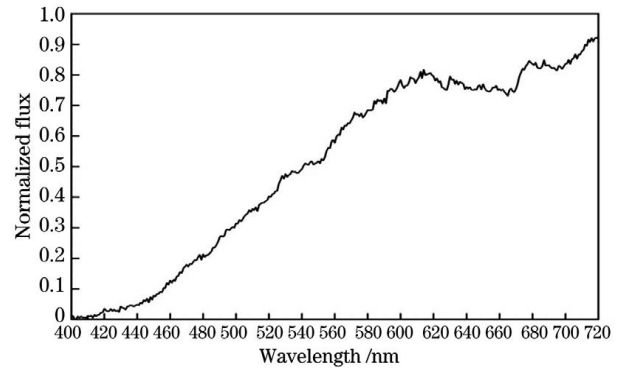


图 13 方法三得到的北极星光谱

Fig. 13 Polaris spectrum obtained by method three

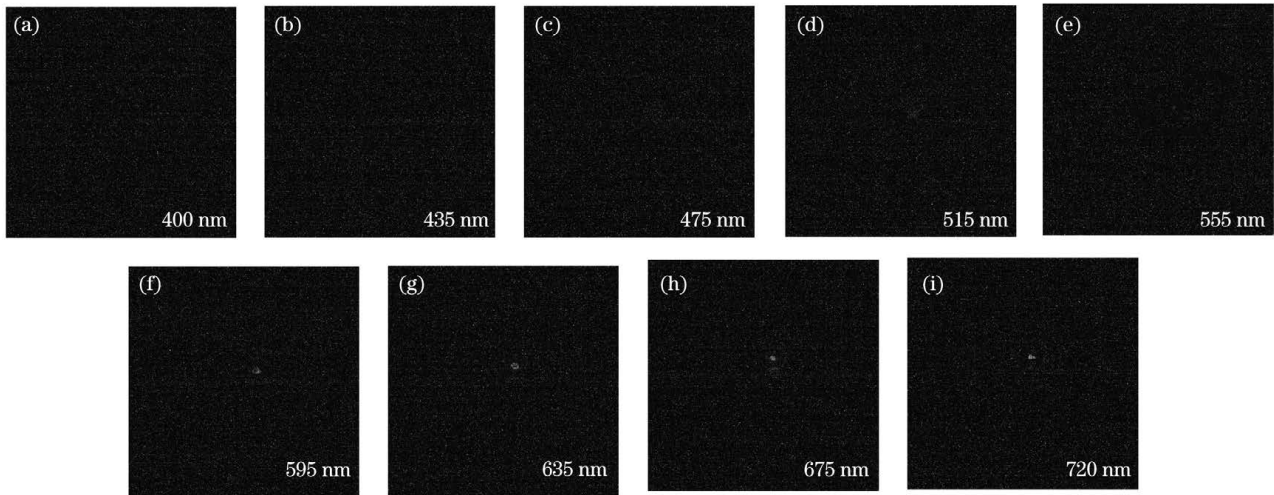


图 14 目标在不同波长处的图像

Fig. 14 Images of target at different wavelengths

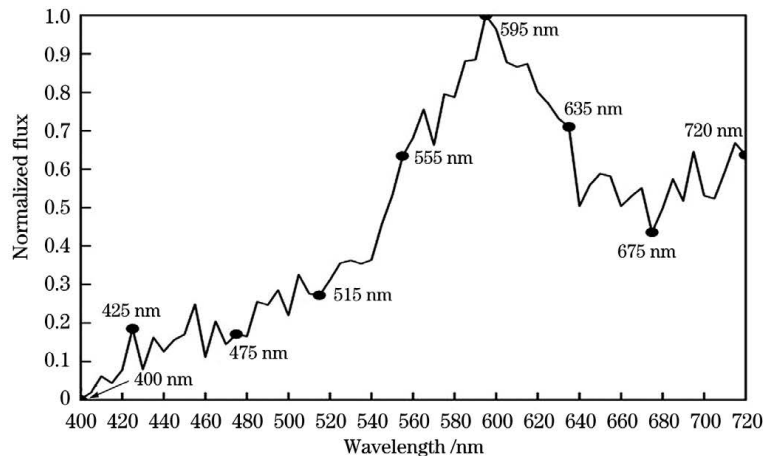


图 15 图 14 所示目标亮度随波长的变化

Fig. 15 Brightness of target in Fig. 14 versus wavelength

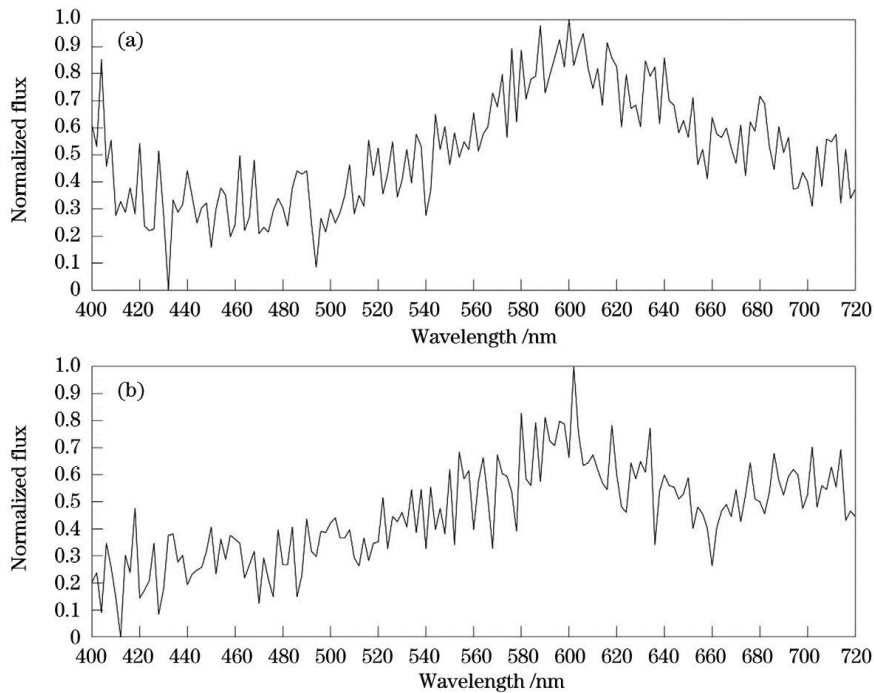


图 16 GEO 目标的光谱数据。(a)第一轮;(b)第二轮

Fig. 16 Spectral data of GEO target. (a) First round; (b) second round

综合光学原理与实际测量情况,可以看出,方法三在恒星、高轨道空间目标、中轨道空间目标、低轨道空间目标光谱测量中效果更好。根据两次高轨道空间目标光谱数据对比结果,可知数据波动差异相对稳定,部分存在波动。观测数据误差主要是由相机拍摄时间间隔、调节液晶可调滤波器信号频率的人为因素引起的,其次是由观测地点上空大气扰动的环境因素导致。

此外,我们还针对空间目标光谱开展了大量观测,总计观测 198 个空间目标,每个空间目标至少观测两次,其中包括少量的低、中轨道空间目标以及大

量的高轨道空间目标和部分空间目标附近的恒星,并记录详细信息。同一目标的光谱数据相似度较好。

#### 4 三种方法的综合评价

本文分别介绍了三种空间目标光谱的观测方法。基于长春人造卫星观测站 1.2 m 大口径望远镜和三种光谱观测终端,我们成功测得了多个目标的光谱数据。三种方法的评价标准可列为设备成本、光路调试复杂程度、获取的光的强度、可调节观测波段、数据处理复杂程度。不同方法的性能对比如表 4 所示。

表 4 不同方法性能对比

Table 4 Performance comparison of different methods

Performance	Project 1	Project 2	Project 3
Equipment cost	High	Medium	Medium
Optical path debugging degree	High	High	Low
Obtained light intensity	Medium	Low	High
Adjustable observation band	Low	High	High
Degree of data processing	Medium	Medium	High

综上所述,文中所述的三种方法均适合开展恒星观测。由于低轨道空间目标具有较高的亮度和速度,因此需要采用对调试稳定度不敏感、数据获取迅速的方法,例如光纤光谱仪或光谱相机的观测方案

比较合适。对于中、高轨道空间目标,根据其通常为暗弱且相对速度慢等特点,选用长曝光的数据获取方式较为合适,例如推扫式光栅光谱仪和光谱相机。虽然上述三种方法各有优点,但均存在无法完

全稳定光路的缺点,因此每次观测前都需要进行光路的细微调整。

下一步,我们将通过对方法三进行改进,如将液晶可调节式滤波器替换成声光可调节式滤波器(AOTF),AOTF比液晶可调节式滤波器更灵活,进而可提高观测效率和数据质量。

## 5 结 论

目前,空间目标光谱观测处于探索实验阶段,观测方法及测量效果尚未达到理想状态,还需要进一步改进与完善。对于不同的观测目标,需根据具体参数与性能,在不同观测环境下采用不同的设备和不同的测试终端进行观测。对三种实验方法的可行性进行测试,并且对细节给出综合评价,研究结果对相关研究具有一定的参考价值,也为今后同类观测手段及性能的提升提供了可借鉴的经验。

### 参 考 文 献

- [1] Vananti A, Schildknecht T, Krag H. Reflectance spectroscopy characterization of space debris[J]. *Advances in Space Research*, 2017, 59(10): 2488-2500.
- [2] Qiu G Q, Yang H J, Wang Y T, et al. Dim target detection in airborne infrared images based on visual feature fusion[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2020, 57(18): 181004.  
仇国庆, 杨海静, 王艳涛, 等. 基于视觉特征融合的机载红外弱小目标检测[J]. *激光与光电子学进展*, 2020, 57(18): 181004.
- [3] Zeng H R, Sun H Y, Du L, et al. High dynamic range image synthesis for space target observation[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2019, 56(4): 041002.  
曾海瑞, 孙华燕, 都琳, 等. 面向空间目标观测的高动态范围图像合成[J]. *激光与光电子学进展*, 2019, 56(4): 041002.
- [4] Zhang F, Zhang Y S, Xu C. Optical scattering characteristics of satellite with fold surface[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(5): 052401.  
张峰, 张雅声, 徐灿. 卫星褶皱表面的光学散射特性[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(5): 052401.
- [5] Han Y G, Xuan Y M. Infrared feature of the satellite[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2005, 34(1): 34-37.  
韩玉阁, 宣益民. 卫星的红外辐射特征研究[J]. *红外与激光工程*, 2005, 34(1): 34-37.
- [6] Huang T, Hu H L, Hu Y H, et al. Laser detection in the identification of space target[J]. *Laser & Infrared*, 2010, 40(7): 685-689.  
黄涛, 胡惠灵, 胡以华, 等. 空间目标识别中的激光探测技术[J]. *激光与红外*, 2010, 40(7): 685-689.
- [7] Wang F G, Zhang W, Wang H Y, et al. Influence of motion status on multispectral optical characteristics of satellites[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(10): 1004002.  
王付刚, 张伟, 汪洪源, 等. 运动状态对卫星多谱段光学特性的影响分析[J]. *光学学报*, 2012, 32(10): 1004002.
- [8] Tippets R D, Wakefield S, Young S, et al. Slitless spectroscopy of geosynchronous satellites[J]. *Optical Engineering*, 2015, 54(10): 104103.