

DOI: 10.3969/j.issn.1007-5461.2023.06.009

高空光谱辐亮度仪的光机设计与实验分析

康祝海^{1,2}, 李新^{1*}, 刘恩超¹, 张权¹, 郑小兵¹

(1 中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所通用光学定标与表征技术重点实验室,
安徽 合肥 230031;
2 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026)

摘要: 针对现阶段星载传感器高精度定标的需求, 研制了高空光谱辐亮度仪, 可应用于辐亮度法替代定标, 提升定标精度。该仪器光谱范围为400~2500 nm, 搭载在高空气球平台上能够在18~35 km高空直接对地测量反射辐亮度。该仪器光机系统主要由前置一体式镜筒、色散模块和光机温控模块组成。为了验证该高空光谱辐亮度仪的可靠性与测量数据的准确性, 在青海大柴旦开展了该仪器与美国 Spectra Vista 公司 SVC 光谱仪的比对实验以及高空飞行实验。实验结果表明: 在地面测量中两台仪器所测辐亮度具有良好的一致性, 二者偏差普遍在±1%以内, 最大偏差在±3.5%以内; 在高空飞行实验中, 研制的辐亮度仪在25 km高空平稳飞行6 h, 获得了高空测量辐亮度, 各模块与探测器温度均稳定保持在设定值。实验结果验证了整个仪器的可靠性, 表明所研制的辐亮度仪满足对卫星传感器的高精度定标需求, 适合于高空高精度测量。

关键词: 遥感; 光机设计; 辐亮度基法; 高空

中图分类号: TH741 文献标识码: A 文章编号: 1007-5461(2023)06-00888-11

Opto-mechanical design and experimental analysis of high-altitude spectral radiance meter

KANG Zhuhai^{1,2}, LI Xin^{1*}, LIU Enchao¹, ZHANG Quan¹, ZHENG Xiaobing¹

(1 Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, HFIPS,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2 University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: In order to meet the current demand for high-precision calibration of satellite-borne remote sensors, a high-altitude spectral radiance meter has been developed, which can be applied to the radiance method instead of the traditional site calibration method to improve calibration accuracy. The instrument has a spectral range from 400 nm to 2500 nm, and can be mounted on a high-altitude balloon platform to measure the reflected radiance to the ground directly at an altitude from 18 km to 35 km. The optical-mechanical system of the instrument is mainly composed of a front integrated lens barrel, a dispersion

基金项目: 国家重点研发计划 (2018YFB0504600, 2018YFB0504604), 国家自然科学基金 (42105139), 中国科学院合肥物质科学研究院院长基金 (YZJJ2020QN4)

作者简介: 康祝海 (1995 -), 云南昭通人, 研究生, 主要从事光学精密仪器设计方面的研究。E-mail: kzh@mail.ustc.edu.cn

导师简介: 郑小兵 (1969 -), 安徽合肥人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事高精度光学遥感仪器定标技术方面的研究。
E-mail: xbzheng@aiofm.ac.cn

收稿日期: 2022-01-07; **修改日期:** 2022-03-10

通信作者: E-mail: xli@aiofm.ac.cn

module and the optical-mechanical temperature control module. In order to verify the reliability of the high-altitude spectral radiance meter and the accuracy of the measured data, a comparison experiment between this instrument and the SVC spectrometer of Spectra Vista (USA), as well as a high-altitude flight experiment, was carried out in Dachaidan, Qinghai. The experimental results show that there is good consistency in the radiance measured by the two instruments, with a deviation of the two instruments generally within $\pm 1\%$ and a maximum deviation within $\pm 3.5\%$. In the high-altitude flight experiment, the instrument can keep stable at an altitude of 25 km in the six-hour flighting, and the temperature of each module and detector remains at the setpoint. In the end, the result of high-altitude measurement radiance was obtained. The experimental result has verified the reliability of the entire instrument, indicating that the developed instrument can meet the high-precision calibration requirements of satellite remote sensors and is suitable for the high-altitude high-precision measurement.

Key words: remote sensing; opto-mechanical design; radiance basis method; welkin

0 引言

卫星载荷长期在太空环境下运行,受到低温、真空、辐射等诸多不利因素影响,其自身的性能参数会随时间不断衰减,需要及时地对卫星载荷进行在轨辐射定标,以保证载荷的稳定性与准确性^[1]。当前,我国主流的卫星载荷辐射定标方法为场地替代定标法,即以地面大面积均匀区域为辐射校正场,当卫星过顶时,通过地面或飞行平台进行对地同步测量,获取地物信息与大气信息,并将相关信息输入至大气辐射传输模型,反演出卫星载荷入瞳处辐亮度,并与载荷输出值之间建立对应关系,从而实现在轨卫星载荷替代辐射定标^[2]。

我国常采用的场地替代定标方法包括:反射率基法^[3,4]、辐照度基法^[3,5]和辐亮度基法^[3]。反射率基法投入的测试设备相对较少,技术成熟,是常用的场地替代定标方法,但其受气溶胶特性的影响而存在一定的系统偏差,且测量地表反射率的不确定性大;辐照度基法利用漫射与总辐射比描述大气气溶胶的散射特性,减少了反射率基法中对气溶胶光学参量的假设带来的误差,但测量数据相对较多,漫射/总辐射比的测量在高纬度地区带来的误差较大;辐亮度基法在一定程度上克服了传统地面设备在测量过程中不确定性大的问题,并且大部分水汽和气溶胶集中在大气下部,需要的大气修订比在地面测量时要小,辐射计飞行高度越高,则大气修订越小^[6]。

基于地面设备的局限,国内外诸多机构开展了高空辐射计的相关研究。如美国喷气推进试验室(JPL)成功研制机载光谱仪AIS,其光谱覆盖范围为1200~2400 nm,具有128个光谱通道^[7];加拿大ITRES公司研制的CASI在400~1100 nm的波长范围内具有288个波段,光谱分辨率达到1.9 nm^[8];上海技物所研制出机载光谱仪PHI,其在450~1000 nm的波长范围内具有128个波段,光谱采样间隔为4 nm^[9]。但上述仪器波段范围有限,飞行高度较低(7~12 km),需进行一定量的大气修订,限制了卫星载荷定标精度的提升。

本文基于现有地面观测设备与高空设备的优缺点,研制了400~2500 nm波段内用于在18~35 km高空观测地表辐亮度的辐射计。重点介绍了仪器的光机设计,并对仪器进行了外场试验,通过外场试验数据分析验证了仪器设计的可靠性。

1 高空光谱辐亮度仪设计

1.1 工作原理

高空光谱辐亮度仪采用辐亮度基法对星载载荷进行替代定标,根据反射辐亮度、大气上行总透过率和大气程辐射,基于大气辐射传输方程可得到星载光学载荷的入瞳处辐亮度,可表示为^[10]

$$L_{\text{TOA}}(\lambda) = L_{\text{path}}(\lambda) + L_{\text{g}}(\lambda)\tau(\mu_{\text{v}}), \quad (1)$$

式中: $L_{\text{path}}(\lambda)$ 为大气程辐射, $L_{\text{g}}(\lambda)$ 为反射辐亮度, $\tau(\mu_{\text{v}})$ 为大气上行总透过率, λ 为波长。

辐亮度是单位面积、单位波长、单位立体角内的辐射通量,其单位为 $\text{W}/(\text{cm}^2 \cdot \text{sr} \cdot \mu\text{m})$,其中 sr 是立体角的单位, μm 是波长单位。辐亮度可表示为^[2]

$$L_{\text{g}}(\lambda) = \frac{\text{d}^2\phi_{\lambda}}{\text{d}A\text{d}\Omega \cos\theta}, \quad (2)$$

式中: $\text{d}A$ 为单位面积, $\text{d}\Omega$ 为单位立体角, $\text{d}\phi_{\lambda}$ 为单位辐射通量, θ 为面积法线与辐射束方向之间的夹角。

高空光谱辐亮度仪主要用于野外高空测量地表辐亮度,仪器探测器响应 D_N 值与辐亮度值 L_{g} 之间为线性转换,转换过程需乘辐亮度响应度 $R(\lambda)$, 即

$$L_{\text{g}}(\lambda) = R(\lambda)D_N, \quad (3)$$

式中: $R(\lambda) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i(\lambda)$, $S_i(\lambda)$ 为仪器的输出信号, $L_{\lambda} = \frac{E_{\lambda d}\rho_{\lambda}}{\pi}$ 为漫反射板的光谱辐射亮度值, ρ_{λ} 为漫反射板在波长为 λ 处的 45° 方向反射比, $E_{\lambda d}$ 为距离 d 处标准灯在波长 λ 处的照度值。由此,高空光谱辐亮度仪的辐亮度响应度可表示为 $R(\lambda) = \frac{\pi S(\lambda)}{E_{\lambda d}\rho_{\lambda}}$ 。

将其代入 (3) 式可得

$$L_{\text{g}}(\lambda) = \frac{\pi S(\lambda)}{E_{\lambda d}\rho_{\lambda}} D_N. \quad (4)$$

1.2 高空光谱辐亮度仪总体设计

基于高空光谱辐亮度仪的工作特点及高空环境,提出表 1 所示的性能指标。该仪器主要由壳体、前置光学模块、分光色散模块、温控模块、定位定向系统 (POS) 等组成,其三维建模如图 1(a) 所示,实物外观图如图 1(b) 所示。前置光学模块用于限制视场,保证入射光的一致性;分光色散模块是该仪器的核心部件,由三个光谱色散模块组成,光信号经平场凹面光栅分光后被阵列探测器接收;温控模块由加热丝、保温层、帕尔贴、环境探测器组成,保证仪器内部温度控制在 $(15 \pm 3)^\circ\text{C}$,三个光学模块内腔温度控制在 $(10 \pm 3)^\circ\text{C}$; POS 每次测量数据时,载荷发送 TTL 电平进行 POS 定位的触发, POS 记录当前测量数据的时间和位置信息。为适应 18 km 以上高空的恶劣条件 (地面和高空的气温差达 66.46°C ,气压差达 84.85 kPa),外壳可采用比重较轻、热膨胀系数较小、防腐蚀性能良好、耐候性良好的铝合金 5A05,并对其表面进行黑色氧化处理 (氧化层厚度为 $7 \sim 8 \mu\text{m}$),不做外表喷塑处理;内部零部件采用铝合金 6061 材料,进行黑色氧化处理。

表 1 高空光谱辐亮度仪的主要性能参数

Table 1 Main performance parameters of high-altitude spectrometer

Parameter	Value
Spectral response range	400~2500 nm
Full width at half maximum	≤ 4 nm @(400~1000 nm); ≤10 nm @(1000~1800 nm); ≤12 nm @(1800~2500 nm);
Field of view (FOV)	3°
Temperature of environment	-70~+50 °C

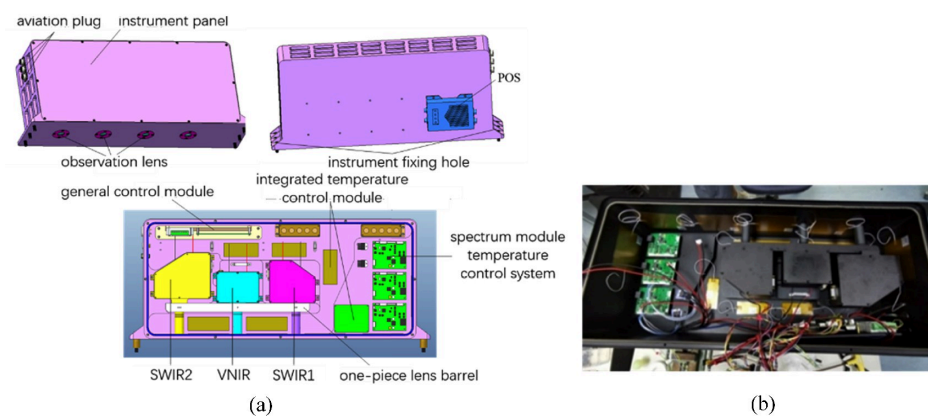


图 1 高空光谱辐亮度仪总体结构。(a) 三维模型; (b) 实物图

Fig. 1 Overall structure of the high-altitude spectrometer. (a) 3D modeling; (b) Physical radiometer

1.3 高空光谱辐亮度仪的前置光学模块设计

为保证三个光谱色散模块入射光的一致性,其前置光学模块采用"一体式镜筒+三个色散模块前置镜筒"的形式,如图2所示。根据地面观测区域的需求及高空气球飞行高度,设计了3°的视场观测镜头,可实现25 km高空观测地面Φ1310 m区域,如图3所示。

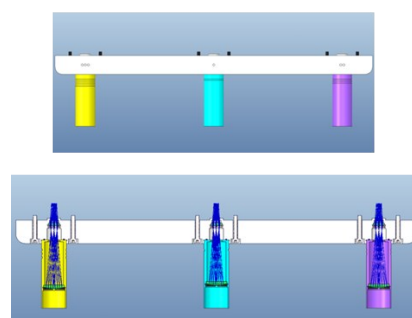


图 2 前置光学模块三维图

Fig. 2 3D image of front optical module

三个色散模块前置镜头的光路结构均采用科勒式照明(物镜+场镜)设计,其光路如图4所示。科勒式照明系统能够将光源均匀成像在物镜入瞳面上,即便光源的亮度不均匀或呈现明显的灯丝结构,也不会影响成像效果,根据前置镜头的光路来设计其机械结构。图5所示为全视场角3°时可见色散模块前置光学镜头的机械结构,分为镜筒、前置光阑、透镜及透镜压圈等部分。近红外、短波红外色散模块的镜头外形和结构与图5相似,在此不再赘述。

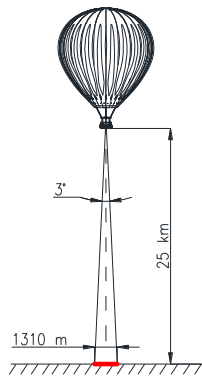


图3 高空光谱辐亮度仪观测视场示意图

Fig. 3 Observation view field of the high-altitude spectrometer

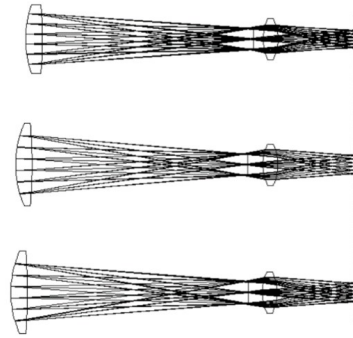


图4 三个色散模块前置镜头光路设计

Fig. 4 Front lens optical path design of three dispersion modules

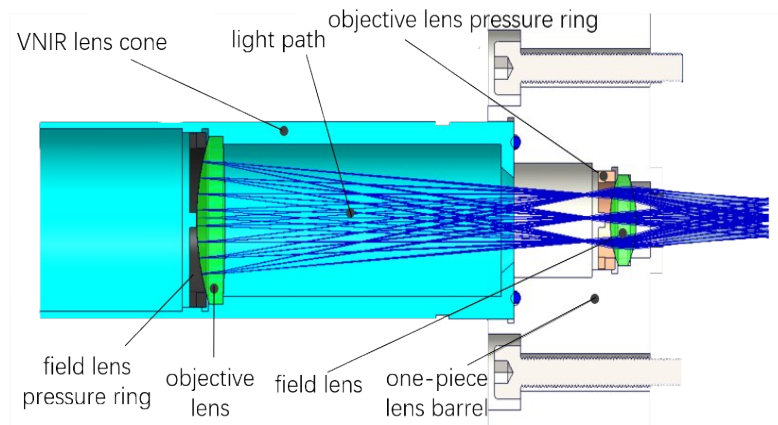


图5 VNIR色散单元镜筒结构图

Fig. 5 Structure diagram of VNIR dispersion unit lens barrel

1.4 光谱色散模块设计

色散模块完成光信号的色散和探测,其设计光谱范围较宽(400~2500 nm),单个模块无法满足宽范围的响应,因此设计了独立的三个色散模块,分别为覆盖400~1000 nm波段范围的可见-近红外色散模块(VNIR)、900~1700 nm波段范围的短波红外色散模块1(SWIR1)以及1600~2500 nm波段范围的短波红外色散模块2(SWIR2)。

平面凹面光栅是三个色散模块的关键部件,对入射狭缝的透过光线进行分光、成像、像差校正,并将其聚到一个平面上^[4],被阵列探测器接收。采用“平场凹面光栅+线阵列探测器”的方案,有利于精简元器件数量,使仪器在运行过程中更加稳定和可靠,其光路如图6所示。

为了满足仪器高空运行的需求,色散模块采用全密封设计,如图7所示。对于900~2500 nm短波红外范围,SWIR1与SWIR2采用的InGaAs阵列探测器对温度的变化比较敏感,为使探测器工作在正常温度,设计了色散模块三级恒温温控。数字温度传感器实时测量探测器所在环境的温度,将实测温度与设定温度做差,控制器开关驱动电路,作用于帕尔贴执行单元进行制冷或加热,并通过导热黄铜作用于探测器,从而保证探测器在正常温度下工作。

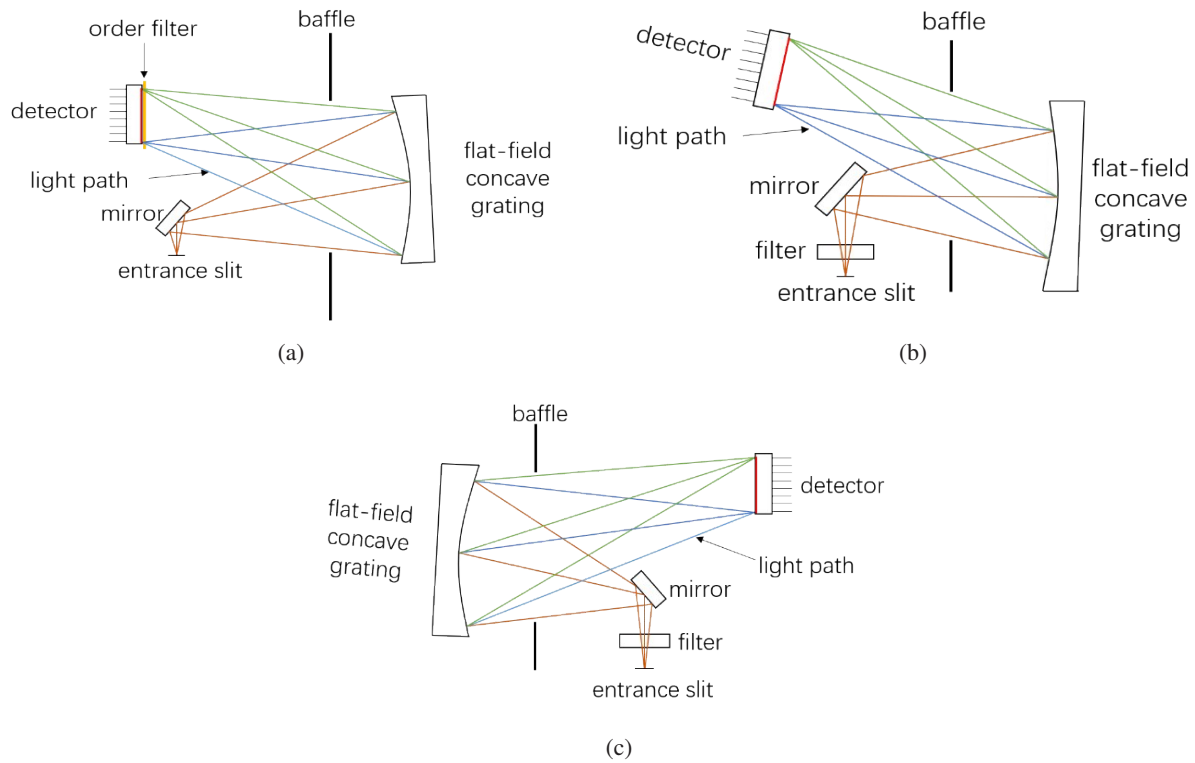


图 6 色散单元模块光路图。(a) VNIR 光路; (b) SWIR1 光路; (c) SWIR2 光路

Fig. 6 Optical path diagrams of the dispersion unit module. (a) VNIR optical path; (b) SWIR1 optical path; (c) SWIR2 optical path

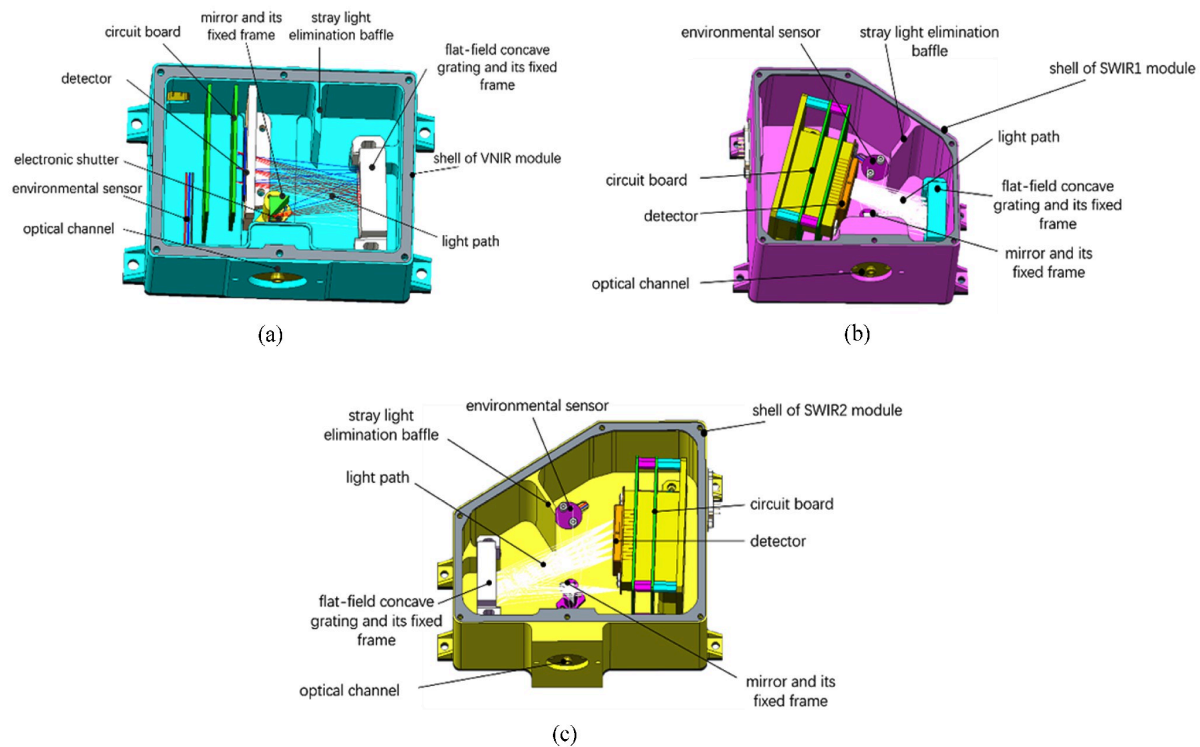


图 7 色散单元模块整体示意图。(a) VNIR 模块; (b) SWIR1 模块; (c) SWIR2 模块

Fig. 7 Overall diagram of the three dispersion unit module. (a) VNIR module; (b) SWIR1 module; (c) SWIR2 module

1.5 光机温控系统设计

高空光谱辐亮度仪运行在 18~35 km 的高空环境中,其工作环境具有低温、低压的特点。以 25 km 高空为例,仪器所在区域为平流层,外部大气环境稳定,温度保持在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$,且温度变化比较均匀^[12],气压只有 5.5 kPa,为地面气压的 5.46%,若没有热控措施,光学载荷整体极端温度水平可达到 $-50\sim+50\text{ }^{\circ}\text{C}$,导致光学器件产生热应力和热变形^[13],影响仪器正常运行。环境温度也会对探测器响应度产生影响^[14],根据设计需求,VNIR 模块采用 Si PDA 阵列探测器,SWIR1 与 SWIR2 采用 InGaAs 阵列探测器,三款探测器的正常工作范围为 $-40\sim65\text{ }^{\circ}\text{C}$,其中,Si PDA 阵列探测器在可见波段最理想的工作温度为 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$,InGaAs 阵列探测器在近红外和短波红外波段最理想的工作温度分别为 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$,而在仪器运行的高空环境中,气温低于 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$,探测器无法处于正常工作温度而无法正常工作。此外,当仪器处于上升过程中,高度超过 3 km 时,空气温度会在 $-4.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以下。根据飞行经验,当气温低于 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,光学窗口在此环境下易出现窗口内表面结霜现象^[15]。窗口内玻璃出现结霜时其透过率变差,阻挡透过光线,影响遥感器探测质量。低温同样也会对模块的长通滤光片产生影响,使长通滤光片产生形变,影响滤光片的透过率,使仪器所测信号减弱。基于高空环境对仪器的影响,对高空光谱辐亮度仪进行温控设计非常重要。根据探测器的运行条件,整体设计方案如图 8 所示,分别为高空光谱辐亮度仪整机加热设计、光谱模块温控设计、探测器制冷设计。

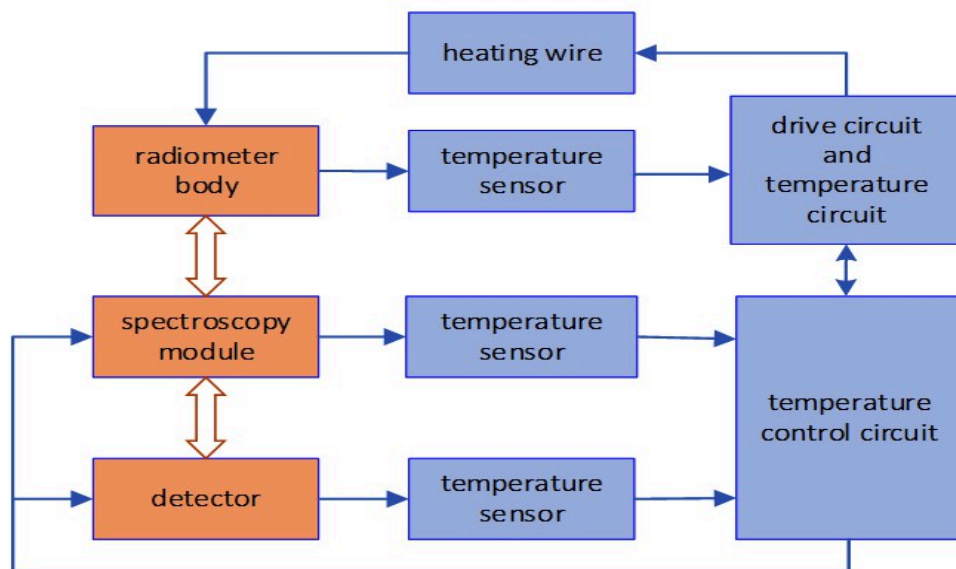


图 8 辐亮度仪温控控制流程

Fig. 8 Control process of radiometer temperature control

高空光谱辐亮度仪主要进行高空气球的搭载飞行试验,高空环境下的温度在 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,因此采用基于加热丝的方案对所研制仪器的壳体进行加热。图 9 为加热丝的实物图,在三个光学模块周围各设置一路 40 W 控温回路,总计控温功耗为 120 W,设置控温阈值为 $[12\text{ }^{\circ}\text{C}, 18\text{ }^{\circ}\text{C}]$,温控电路通过比较实际电压值与标称电压阈值完成对加热片的开关控制,当工作模式为低于 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时进行加热,高于 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时停止工作。

为保证光谱模块的温度稳定性,采用基于帕尔贴的恒温控制方案。帕尔贴是根据热稀电效应制作的半导体 P-N 节器件,可以通过改变热电制冷器两端偏置电流的大小和方向来进行制冷和制热,其体积小、温度响应好,常用于空间有限和高可靠性的场合。图 10 为热电制冷器的实物图,尺寸为 $30\text{ mm} \times 30\text{ mm} \times 4\text{ mm}$,

初步选用功率 80 W, 设定光谱模块稳定在 10 °C, 精度为 ± 3 °C, 当数字温度传感器实时测量探测器所在环境的温度, 将实测温度与设定温度做差, 电路作用于帕尔贴执行单元进行制冷或加热, 方案如图 11 所示。

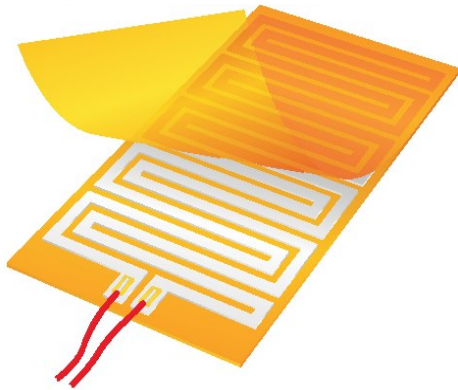


图 9 加热丝实物

Fig. 9 Physical map of the heating wire

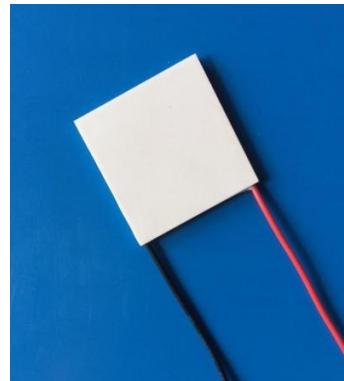


图 10 热电制冷器实物图

Fig. 10 Physical map of the TEC

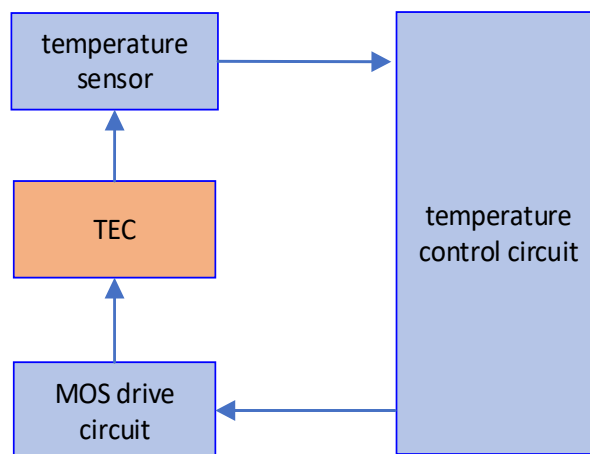


图 11 光谱模块温控流程图

Fig. 11 Temperature control flow chart of spectroscopy module

根据铟镓砷探测器工作特性, 设置 SWIR1、SWIR2 波段线阵探测器的工作温度分别为 -10 °C、-20 °C, 因此探测器采用制冷设计。采用大电流运算放大器驱动电路作为驱动, 探测器内置热敏电阻作为反馈, 内置一级制冷器作为制冷执行器, 实现优于 1 °C 的温控精度。将实测温度与设定温度做差, 大电流运算放大器驱动电路形成温控信号作用于探测器内部一级制冷器, 从而实现探测器制冷, 一级制冷器所产生热量由导热黄铜导出。

至此, 通过整机的加热设计、光谱色散模块的温控设计以及探测器的制冷设计, 保持了温控系统的恒温效果。

2 外场实验结果与讨论

2.1 高空光谱辐亮度仪与 SVC 光谱仪地面比对实验

为验证高空光谱辐亮度仪的可靠性, 中国科学院安徽光学精密机械研究所于 2021 年 8 月对所研制高空

辐亮度仪及美国 Spectra Vista 公司生产的 SVC HR-1024I 光谱仪进行了地面对比实验, 测量目标为 $400\text{ mm} \times 400\text{ mm}$ 的参考漫反射板, 验证了测量数据的可靠性。测量地点为安徽光学精密机械研究所楼顶, 实验场景如图 12(a) 所示。对比高空光谱辐亮度仪测得的辐亮度 L_1 和 SVC 光谱仪测得辐亮度 L_2 , 并计算二者的相对偏差 $\frac{L_1 - L_2}{L_2} \times 100\%$ 。图 12 (b)、(c) 分别为两台仪器测得的辐亮度值及二者的相对偏差, 测量时间为 8 月 25 日 10:30~12:30。由于 1400、1900、2400 nm 处于大气的吸收带, 仪器在这些波段测得的数据不具备可靠性, 因此不予考虑^[6]。由图可见, 在全波段范围内 L_1 和 L_2 的趋势相同, 去除大气吸收带附近波段后二者偏差普遍在 $\pm 1\%$ 以内, 最大偏差在 $\pm 3.5\%$ 以内。其中, 在 $400\sim 1600\text{ nm}$ 最大偏差小于 $\pm 2\%$, $1600\sim 2300\text{ nm}$ 以后最大偏差小于 $\pm 3.5\%$ 。

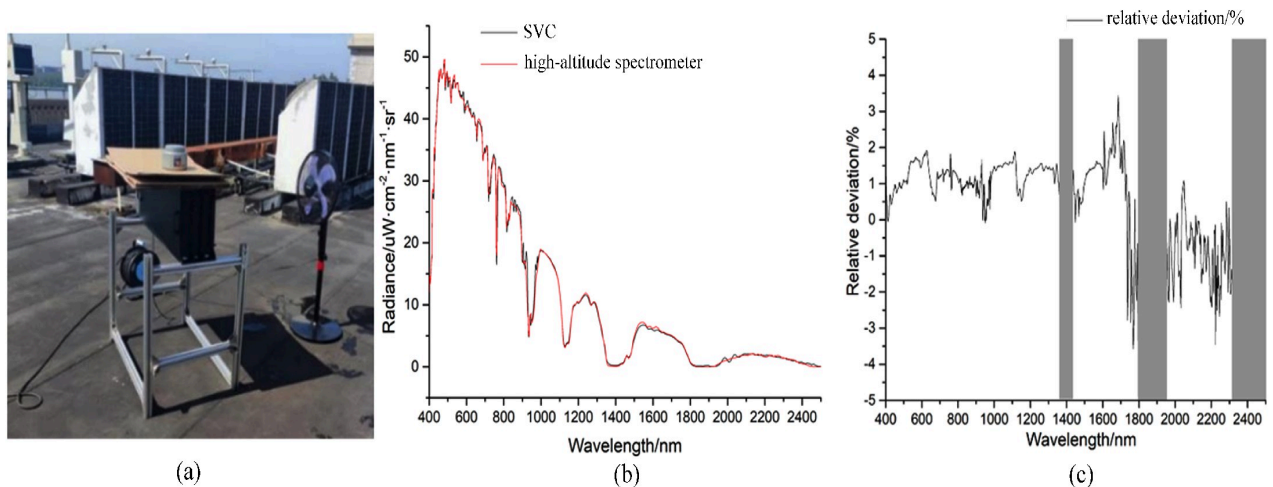


图 12 所研制的辐亮度仪与 SVC 对比实验。(a) 实验现场; (b) 反射辐亮度; (c) 相对偏差

Fig. 12 Comparison experiment of developed radiometer and SVC. (a) Experiment filed;
(b) Reflected radiance; (c) Relative deviation

2.2 所研制辐亮度仪搭载高空气球飞行实验

为验证所研制辐亮度仪的高空环境适应性, 2021 年 9 月 20 日在青海大柴旦进行了高空气球飞行实验, 如图 13(a) 所示。球载高空光谱辐亮度仪单次飞行过程分为上升段、平飞段与降落阶段。气球由地面放飞, 上升 2 h 后到达 25 km 海拔高度, 之后进入平飞观测阶段, 如图 13(b) 所示。在 25 km 处实测环境温度约为 $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, 如图 13(c)。平飞阶段结束后气球开始降落, 吊舱以约 7 m/s 的速度着地, 随后被回收。对高空光谱辐亮度仪在青海大柴旦野外环境的测试数据进行了分析, 当天 8:00~14:00 处于平飞阶段, 每隔 1 h 选取一次辐亮度数据, 如图 13(d) 所示, 在 6 h 的飞行实验中辐亮度仪始终保持正常运行。

选取平飞阶段高空光谱辐亮度仪实测的模块温度数据与实测探测器温度数据进行短期温控精度分析, 图 13(e) 与图 13(f) 分别为实测模块温度与实测探测温度的变化趋势。由图 13(e) 可知色散模块温度最高为 $11.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、最低为 $9.8\text{ }^{\circ}\text{C}$, 温度始终维持在设定范围内。由图 13(f) 可知 SWIR1、SWIR2 模块探测器温度分别始终维持在 $(-10 \pm 0.5)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $(-20 \pm 0.5)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。可见在温差较大的高空环境中, 高空光谱辐亮度仪的温控系统表现出良好的稳定性, 验证了温控设计的可靠性。

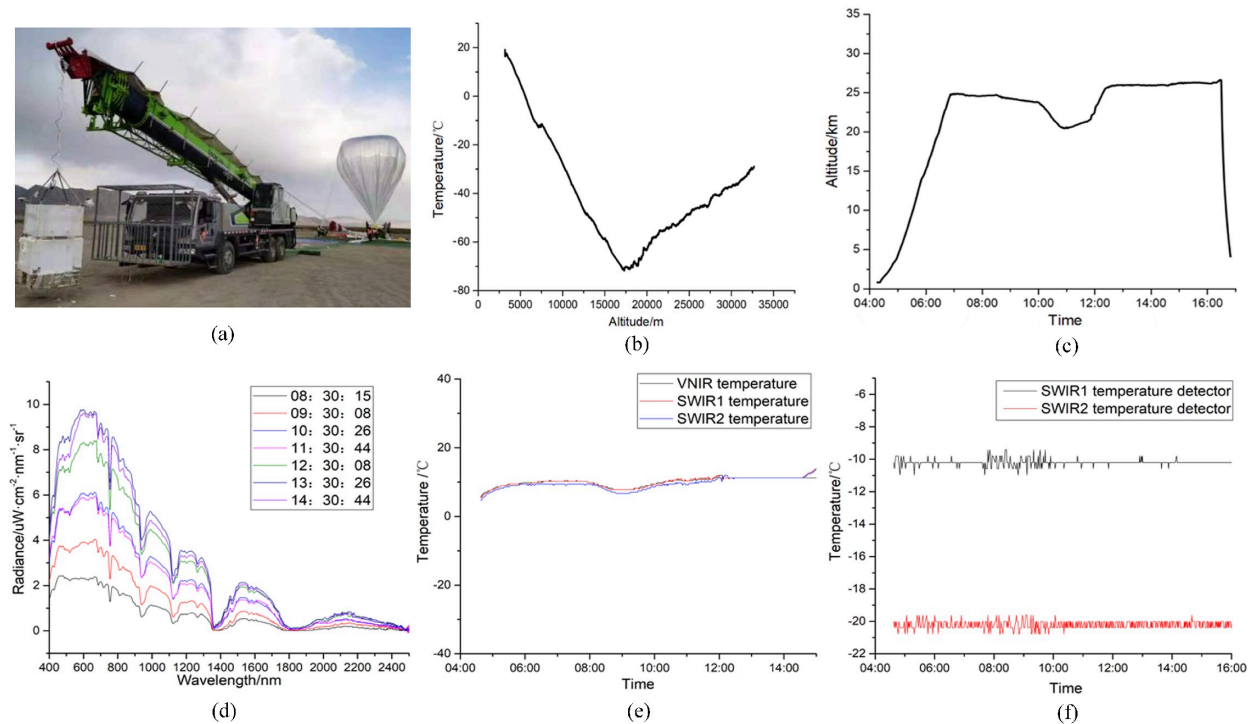


图 13 野外高空气球飞行试验。(a) 试验现场; (b) 海拔-温度示意图; (c) 辐射计飞行高度;
(d) 地表反射辐亮度; (e) 模块温度; (f) 探测器温度

Fig. 13 Flight experiment of field high-altitude balloon. (a) Experiment filed; (b) Schematic illustration of temperature and altitude;
(c) Flying-height of radiometer; (d) Surface-reflected radiance; (e) Module temperature; (f) Detector temperature

3 结 论

介绍了高空光谱辐亮度仪的光机系统设计, 用平场凹面光栅作为分光元件、阵列探测器作为响应元件, 同时对仪器进行了温控设计。高空光谱辐亮度仪通过直接对地观测获得辐亮度, 为验证仪器的可靠性, 将所研制仪器与 SVC 光谱仪进行了比对实验, 实验结果表明二者所测辐亮度整体趋势相同, 且偏差普遍在 $\pm 1\%$ 以内, 最大偏差小于 $\pm 3.5\%$, 所测数据具有较高的精度。在青海大柴旦进行了气球飞行实验, 实验结果验证了此高空辐亮度仪的可行性。

参考文献:

[1] Yin Y P, Li X, Zheng X B, *et al.* Design and implement of automated site observing radiometer [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2016, 11(1): 44-50.
 尹亚鹏, 李新, 郑小兵, 等. 场地自动化观测辐射计的设计与实现 [J]. *大气与环境光学学报*, 2016, 11(1): 44-50.
 [2] 顾行发, 田国良, 余涛, 等. 航天光学遥感器辐射定标原理与方法 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
 [3] Gao H L, Gu X F, Yu T, *et al.* The research overview on visible and near-infrared channels radiometric calibration of spaceborne optical remote sensors [J]. *Remote Sensing Information*, 2010, 25(4): 117-128.
 高海亮, 顾行发, 余涛, 等. 星载光学遥感器可见近红外通道辐射定标研究进展 [J]. *遥感信息*, 2010, 25(4): 117-128.
 [4] 董毅, 吕佳彦, 宋青涛, 等. 反射率基法辐射定标原理和流程介绍 [J]. *科技创新与应用*, 2016, 24: 71-72.

- [5] Hu X Q, Zhang Y X, Qiu K M. In-flight radiometric calibration for VIR channels of FY-1C satellite sensor by using irradiance-based method [J]. *Journal of Remote Sensing*, 2003, 7(6): 458-464.
胡秀清, 张玉香, 邱康睦. 采用辐照度基法对FY-1C气象卫星可见近红外通道进行绝对辐射定标 [J]. 遥感学报, 2003, 7(6): 458-464.
- [6] Slater P N, Biggar S F, Holm R G, et al. Reflectance- and radiance-based methods for the in-flight absolute calibration of multispectral sensors [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1987, 22(1): 11-37.
- [7] Kruse F A. Use of airborne imaging spectrometer data to map minerals associated with hydrothermally altered rocks in the northern grapevine mountains, Nevada, and California [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1988, 24(1): 31-51.
- [8] Qin K. *Research on Key Technologies of Airborne Imaging Hyperspectral Remote Sensing and Its Application* [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2018.
秦凯. 机载成像高光谱遥感及应用关键技术研究 [D]. 北京: 中国地质大学, 2018.
- [9] Shao H, Wang J Y, Xue Y Q. Key technology of push broom hyperspectral imager (PHI) [J]. *Journal of Remote Sensing*, 1998, 2(4): 251-254.
邵晖, 王建宇, 薛永祺. 推帚式超光谱成像仪(PHI)关键技术 [J]. 遥感学报, 1998, 2(4): 251-254.
- [10] Liu Y K, Ma Z H, Ma L L, et al. Vicarious radiometric calibration using a ground radiance-based approach: A case study of sentinel 2A MSI [C]. *IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Valencia, Spain. *IEEE*, 2018: 3296-3299.
- [11] Li X, Zheng X B, Hong J, et al. Optical and mechanical design of SWIR hyperspectral field spectroradiometer [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2007, 15(11): 1656-1661.
李新, 郑小兵, 洪津, 等. 高光谱短波红外地物光谱仪的光机设计 [J]. 光学精密工程, 2007, 15(11): 1656-1661.
- [12] Deng L J. *Study on Thermal Control System of A Near Space Vehicle* [D]. Nanjing: Nanjing University of Science & Technology, 2009.
邓丽君. 一种临近空间浮空器热控系统研究 [D]. 南京: 南京理工大学, 2009.
- [13] Yoder. *Opto-Mechanical Systems Design* [M]. Transl. by Zhou H X, Cheng Y F. Beijing: China Machine Press, 2008: 725-750.
约德. 光机系统设计 [M]. 周海宪, 程云芳, 译. 北京: 机械工业出版社, 2008: 725-750.
- [14] Starks P J, Walter-Shea E A, Schiebe F R, et al. Temperature sensitivity characterization of a silicon diode array spectrometer [J]. *Remote Sensing of Environment*, 1995, 51(3): 385-389.
- [15] Li Y W, Zhang H W, Zhan L, et al. Influence of high altitude environment on optical window in aerial remote sensor [J]. *Laser & Infrared*, 2012, 42(9): 1035-1039.
李延伟, 张洪文, 詹磊, 等. 高空环境对航空遥感器光学窗口的影响 [J]. 激光与红外, 2012, 42(9): 1035-1039.
- [16] Li L, Qiao Y L, Gu X F, et al. A laboratory verification method of wide field vision effect based on miniature model [J]. *Remote Sensing Information*, 2013, 28(2): 70-75, 81.
李丽, 乔延利, 顾行发, 等. 基于缩微模型法的宽视场效应试验室验证方法研究 [J]. 遥感信息, 2013, 28(2): 70-75, 81.