中国光学（中英文） Chinese Optics 核心期刊

星载全谱段高光谱系统设计

吴寅 王跃明 张东

Design of spaceborne full-spectrum hyperspectral system

WU Yin, WANG Yue-ming, ZHANG Dong

引用本文:
吴寅, 王跃明, 张东. 星载全谱段高光谱系统设计[J]. 中国光学, 2025, 18(2): 368-375. doi: 10.37188/CO.2024-0150
WU Yin, WANG Yue-ming, ZHANG Dong. Design of spaceborne full-spectrum hyperspectral system[J]. *Chinese Optics*, 2025, 18(2): 368-375. doi: 10.37188/CO.2024-0150

在线阅读 View online: https://doi.org/10.37188/CO.2024-0150

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

全自动推扫式高光谱显微成像系统设计与研究

Design and research of fully automatic push-broom hyperspectral microscopic imaging system

中国光学（中英文）. 2021, 14(6): 1486 https://doi.org/10.37188/CO.2021-0040

全景双谱段红外成像干涉光谱测量反演仪器

Panoramic bispectral infrared imaging interference spectrum measurement inversion instrument

中国光学（中英文）. 2022, 15(5): 1092 https://doi.org/10.37188/CO.2022-0114

超光谱分辨率紫外双通道共光路成像光谱仪设计

Hyperspectral resolution ultraviolet dual channel common optical path imaging spectrometer

中国光学（中英文）. 2022, 15(5): 1029 https://doi.org/10.37188/CO.2022-0125

应用于作物荧光检测的改进型Offner光谱仪设计

Design of an improved Offner spectrometer for crop fluorescence detection

中国光学（中英文）. 2021, 14(6): 1459 https://doi.org/10.37188/CO.2021-0073

星载低温光学系统热控设计与飞行验证

Thermal control design and flight test of a satellite-borne cryogenic optical system

中国光学（中英文）. 2023, 16(3): 542 https://doi.org/10.37188/CO.2022-0200

可见/近红外实时成像光谱仪控制系统设计

Design of a control system for a visible/near-infrared real-time imaging spectrometer

中国光学（中英文）. 2022, 15(2): 348 https://doi.org/10.37188/CO.2021-0119

文章编号　2097-1842(2025)02-0368-08

星载全谱段高光谱系统设计

吴　寅[1,2], 王跃明[1*], 张　东[1]
（1. 中国科学院上海技术物理研究所 空间主动光电技术重点实验室, 上海 200083;
2. 中国科学院大学, 北京 100049）

摘要: 受航天器体积和重量限制, 航天星载遥感探测系统难以兼顾大口径、高分辨率以及高光谱信息同步获取的需求。针对这一问题, 本文提出一种新型的高光谱成像系统, 采用主次镜共用、多通道分离同轴五反光路设计, 结合 Offner 凸面光栅光谱仪分光技术, 实现从可见到长波红外的高光谱探测。该系统主镜口径为 1 000 mm, 在 500 km 轨高下, 可见和短波、中波、长波、全色波段空间分辨率分别优于 2 m、3 m、6 m 和 1 m。且系统全视场可达到 2.3°, 满足 20 km 幅宽的探测要求。为提高系统的像差与畸变校正能力, 设计中引入高阶非球面, 形成像方远心光路, 实现了望远镜与光谱仪的光瞳匹配。此外, 本文还将光谱仪模块整体放入冷箱制冷, 从源头上抑制光机结构背景辐射对成像质量的影响。最终设计结果表明, 该系统成像质量优良、布局简单且体积轻便, 而且能够实现全谱段高光谱信息的同步获取, 可广泛应用于星载对地探测成像等领域。

关　键　词: 星载; 高光谱; 全谱段; 凸面光栅光谱仪; 背景辐射
中图分类号: O436　　**文献标志码:** A　　**doi:** 10.37188/CO.2024-0150　　**CSTR:** 32171.14.CO.2024-0150

Design of spaceborne full-spectrum hyperspectral system

WU Yin[1,2], WANG Yue-ming[1*], ZHANG Dong[1]
（1. *Key Laboratory of Space Active Opto-Electronics Technology*, *Shanghai Institute of Technical Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Shanghai* 200083, *China*;
2. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*）
* *Corresponding author*, *E-mail*: *wangym@mail.sitp.ac.cn*

Abstract: Due to spacecraft's volume and weight constraints, it is challenging to simultaneously obtain large aperture, high resolution, and hyperspectral information in spaceborne remote sensing systems. We propose a novel hyperspectral imaging system that utilizes a shared primary and secondary mirror design and a coaxial five-mirror optical path for multi-channel separation. By integrating Offner convex grating spectroscopy, the system enables hyperspectral detection from the visible to the long-wave infrared spectrum. Design results indicate that with a primary mirror diameter of 1 000 mm at an altitude of 500 km, the spatial resolution in the visible and short-wave bands exceeds 2 m, in the mid-wave band exceeds 3 m, in the long-wave band exceeds 6 m, and the panchromatic resolution is better than 1 m. The system achieves a full field of view of 2.3°, accommodating a swath width of 20 km for detection. To enhance the system's aberration and distor-

收稿日期: 2024-08-25; **修订日期:** 2024-09-18
基金项目: 民用航天预研重点项目(No. D040102)
Supported by Key Civil Space Pre-Research Project (No. D040102)

tion correction capabilities, high-order aspheric elements are incorporated to create a telecentric optical path, ensuring optimal matching between the telescope and the spectrometer. Furthermore, we propose housing the spectrometer module in a cooling chamber to effectively mitigate the impact of background radiation from the optical structure on image quality. The final design demonstrates excellent imaging quality, a simple layout, and a compact structure, enabling the simultaneous acquisition of high spectral information across the entire spectrum. This system has broad applications in satellite-based earth observation and imaging.

Key words: spaceborne; hyperspectral; full-spectrum; convex grating spectrometer; background radiation

1　引　言

光谱成像技术融合了成像技术与光谱技术，可有效捕获目标的空间与光谱双重信息。目前在轨高光谱卫星受限于空间分辨率，仅能满足大尺度目标的观测需求。针对农作物监测、林业分类、城市多属性观测等小尺度场景，低空无人机虽能提供高分辨率数据，但效率瓶颈限制了其在大区域作业的应用。未来发展方向应聚焦于航天平台。国际上已经部署多个大口径高光谱成像系统，旨在将光谱成像的空间分辨率提升至米级乃至亚米级，光谱分辨率提升至纳米级，探测波段覆盖可见到长波红外，波段数也增至数百，大幅提升了遥感信息获取能力以满足精细化管理的数据需求。国内外已有多个光谱成像系统投入应用，例如美国的 Landsat-9[1]、WorldView-4[2]，德国的 EnMap[3-4]，意大利的 PRISMA[5] 和日本的 HISUI[6] 等，国内 GF-5 搭载的可见短波高光谱相机[7]、全谱段多光谱成像仪[8]，5M 光学卫星 01 星和 02 星搭载的高光谱相机和可见/近红外多光谱相机[9-10]，珠海一号 03 组卫星[11] 等。“高空间分辨率、高光谱分辨率、高时间分辨率”正成为高光谱遥感的新趋势，以支持长期天气监测、精准农业管理、矿产资源调查和战场要素获取等新应用。

我国现运行的光谱成像系统存在分辨率低、谱段覆盖范围有限，无法同步获取全谱段高光谱信息等不足。基于凸面光栅分光的高光谱成像可获取单个对象的连续特征光谱图像，但需采用探测器拼接技术满足大幅宽、高分辨率遥感探测的需求。本文从应用需求出发，对同轴共口径光学系统进行优化，拓宽成像面。通过引入高阶非球面、降低畸变、拓宽光谱成像范围、提高系统分辨率、利用不同谱段光谱仪拼接，实现共口径下的全谱段高光谱成像。

2　系统设计

2.1　系统分析

该星载高光谱成像系统可探测 0.4 μm 至 12.5 μm 的光谱范围，全视场 2.3°，工作轨道为 500 km，幅宽为 20 km。系统面临的主要挑战是通过单台相机实现全色成像(PAN)以及可见(VNIR)、短波(SWIR)、中波(MWIR)和长波(LWIR)的高光谱成像。本文采用主次镜共用设计，在主镜后的一次成像处设置视场分离器，将光路分为可见短波高光谱、全色光谱和中长波高光谱 3 个通道。此外，将两个高光谱通道进一步通过视场分离器分为可见、短波、中波、长波通道，以实现全谱段高光谱数据获取。高光谱通道增加反射镜以调节不同 F 数，其中可见短波通道 F 数为 3.75，中长波通道 F 数为 2.50，全色通道 F 数为 3.75。

考虑到凸面光栅的高光学效率、优良的像质和光谱特性，以及其简单的结构，依据应用需求选用凸面光栅光谱仪进行分光成像。综合考虑各项需求，将光学系统技术指标汇总如表 1 所示。

表 1　光学系统的主要技术指标

Tab. 1　Key technical specifications of the optical system

类别	波段/μm	像元尺寸/μm	焦距/mm	F数	空间分辨率/m	幅宽/km	视场角/(°)	像元数
全色	0.4-0.8	7.5	3750	3.75	1			20000
可见	0.4-0.9	15.0	3750	3.75	2			10000
短波	0.9-2.5	15.0	3750	3.75	2	20	2.3	10000
中波	3.5-5.0	15.0	2500	2.50	3			6667
长波	8.0-12.5	30.0	2500	2.50	6			3334

2.2 望远镜设计

高光谱成像系统的核心在于望远镜光学系统和分光方案的合理设计与优化，这两者共同决定了系统的空间分辨力、光谱分辨能力及信噪比，从而直接影响遥感数据的质量和应用效果。本研究基于同轴三反结构设计全色通道。再基于全色的主次镜采用视场分离器增加高光谱五反通道，从而提高光学系统效率并实现望远镜和光谱仪的光瞳匹配。选择一个同轴三反结构作为初始框架，视场离轴设计涵盖沿轨 0.2°~0.3°视场以及穿轨±1.15°视场。通过引入偶次非球面，对初始结构进行优化，既能提供高分辨率图像数据，又可与高光谱图像数据融合，从而提升高光谱图像的空间分辨率，最终生成高质量的遥感图像。其中，偶次非球面的面型矢高定义为：

$$z=\frac{cr^2}{1+\sqrt{1-(K+1)c^2r^2}}+a_1r^2+a_2r^4+a_3r^6+a_4r^8+\cdots\quad,\qquad(1)$$

式中，c 为顶点曲率，K 为二次曲线系数，a_1、a_2、a_3、$a_4\cdots$ 为高次非球面系数，z 和 r 分别为镜面轴向坐标和径向坐标。引入偶次非球面后，全色调制传递函数（MTF）优于 0.51，畸变小于 0.5%，很好地弥补了视场离轴系统畸变大的问题，结果如图 1~图 2（彩图见期刊电子版）所示。

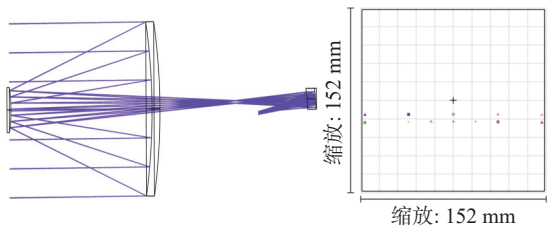
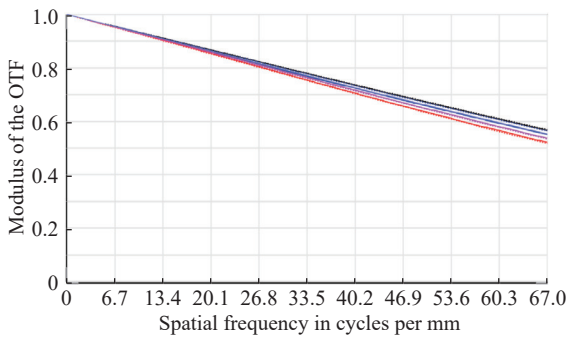


图 1 全色通道像面光迹图

Fig. 1 Panchromatic channel optical footprint diagram



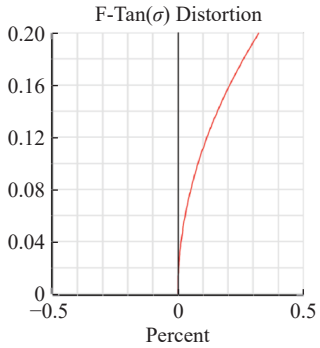


图 2 全色通道调制传递函数和畸变图

Fig. 2 Panchromatic channel MTF and distortion diagram

全色通道采用 5 片可见近红外 CMOS 探测器以品字形拼接。单片探测器的面阵规模为 4 096×5，像元尺寸为 7.5 μm，穿轨像元总数为 20 480。在探测器拼接方案中，采用顺序拼接策略：首先确立一片探测器作为基准单元，然后逐一将相邻探测器与之精确对接，每完成一次拼接便形成新的基准，直至所有探测器按顺序完成拼接，最终构成长线阵探测器系统。拼接方案如图 3（彩图见期刊电子版）所示。

图 3 全色探测器拼接方案

Fig. 3 Assembly scheme for panchromatic detectors

在全色主次镜的中间焦面附近设置视场分离器将各通道进行分离。使望远镜和光谱仪实现光瞳匹配，以控制望远镜高光谱通道为像方远心光路。高光谱通道探测器拼接方式和全色通道一致，均采用面视场设计，通道及视场配置方式如图 4（彩图见期刊电子版）所示。

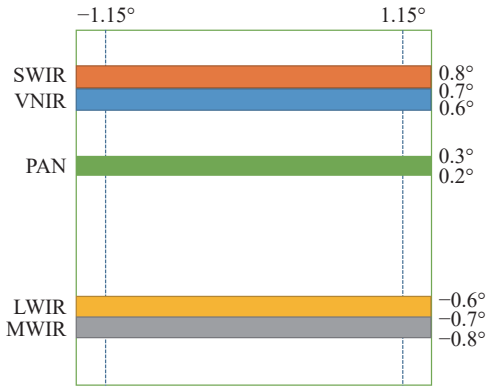


图 4 系统视场配置方式

Fig. 4 Configuration of the system's field of view

最终得到望远镜系统可见传递函数优于

0.82, 短波传递函数优于 0.68, 中波传递函数优于 0.48, 长波传递函数优于 0.49, 如图 5、6(彩图见期刊电子版)所示。

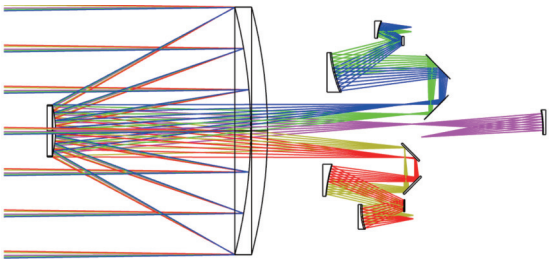


图 5　望远镜系统光路图

Fig. 5　Optical path diagram of telescope system

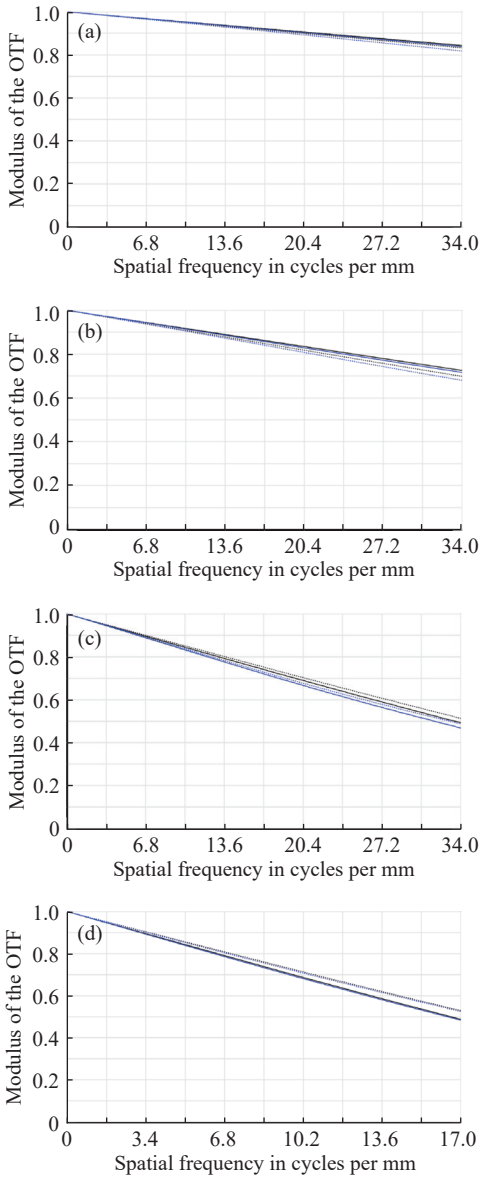


图 6　望远镜系统各谱段 MTF 图。(a) VNIR; (b) SWIR; (c) MWIR; (d) LWIR

Fig. 6　MTF diagram of each spectral band. (a) VNIR; (b) SWIR; (c) MWIR; (d) LWIR

2.3　光谱仪设计

2.3.1　光谱仪指标分析

凸面光栅成像光谱仪以其高光学效率、优良的成像质量和光谱特性以及结构简单等优势, 在国内得到迅速发展。中国科学院上海技术物理研究所、中国科学院长春光学精密机械与物理研究所及苏州大学等单位都研制出高精度凸面光栅光谱仪。例如, 2018 年发射的 GF-5 卫星搭载的可见短波红外高光谱相机 AHSI, 其狭缝长达 60 mm, 在轨运行期间展现了出色的应用效果[12]。本方案中要实现 20 km 的幅宽, 则单光谱仪狭缝长度需达到 150 mm, 然而常规的 Offner 光谱仪在设计超长狭缝时, 难以有效校正像差及光谱弯曲。为满足高光谱分辨率和高质量图像的需求, 本光谱仪采用错位拼接的形式, 如图 7(彩图见期刊电子版)所示。各谱段光谱仪参数如表 2 所示。

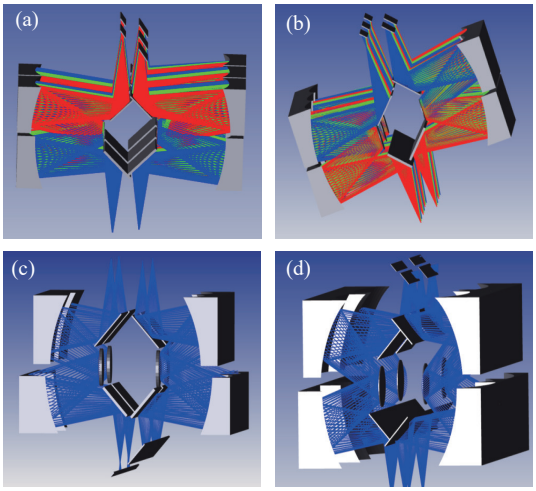


图 7　光谱仪拼接方案。(a) 可见光光谱仪; (b) 短波光谱仪; (c) 中波光谱仪; (d) 长波光谱仪

Fig. 7　Splicing scheme of the spectrometer. (a) VNIR splicing; (b) SWIR splicing; (c) MWIR splicing; (d) LWIR splicing

表 2　各谱段光谱仪参数

Tab. 2　Structural parameters of Offner spectrometer in each spectral band

类别	可见	短波	中波	长波
光谱分辨率/nm	10	20	40	80
波段数	50	80	37	56
像元尺寸/μm	15	15	15	30
光谱色散/mm	0.75	1.20	0.56	1.68
探测器规模	2048×256	2048×256	2048×256	1 024×256
光谱仪数量	5	5	4	4
狭缝/mm	30×5	30×5	25×4	25×4
相对孔径	0.13	0.13	0.20	0.20

2.3.2 光谱仪公差分析

光谱仪的公差主要包括面形参数、面形的表面公差及各反射镜的位置公差。将 Offner 光谱仪的光栅位置设定为所有光学元件的安装检测基准，并将光栅的平移和倾斜容差设置为零。考虑到模块化安装，可以将光源物距和光谱仪像距作为补偿量，从而放宽反射镜的面形公差。

根据目前高精密仪器制造厂家的研制能力，以此作为公差参数的设定基础。以奈奎斯特采样频率处调制传递函数（MTF）作为评价标准，光谱仪的后截距为调焦补偿距离。在进行 500 次蒙特卡罗分析后，在 90% 的情况下，MTF 值大于 0.15，结果表明公差设置合理[13]。公差设置如表 3 所示。

表 3 光谱仪公差设置

Tab. 3 Tolerance setting for spectrometer

类别	反射镜M1	光栅	反射镜M2
曲率半径/mm	±0.01	±0.01	±0.01
厚度/mm	±0.01	±0.005	±0.01
*XY*偏心/mm	±0.01	-	±0.01
*XY*倾斜/°	±0.005	-	±0.005
S+A不规则度/光圈	±0.5	-	±0.5

结果显示，可见光光谱仪 MTF>0.75，短波光谱仪 MTF>0.63，中波光谱仪 MTF>0.42，长波光谱仪 MTF>0.38，各波段光谱仪均具有生产可行性。

2.4 全系统设计

由于光谱仪和望远镜独立装调后进行拼接可降低装调难度，所以在设计阶段需要严格把控系统像质和远心度。通过调整光谱仪和望远镜系统以及探测器的相对位置，补偿装调以及元件面型精度所带来的误差。将各个光谱仪模块拼接好后对接望远镜系统。图 8（彩图见期刊电子版）为全系统光路图，图 9（彩图见期刊电子版）为全系统各谱段的传递函数图。

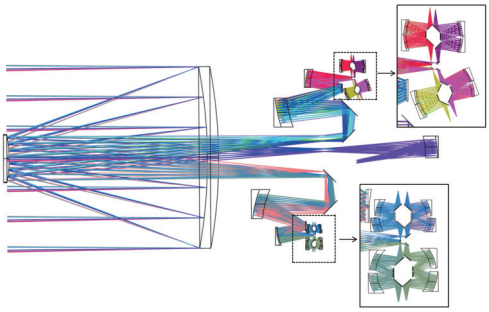


图 8 全系统光路图

Fig. 8 Optical path diagram of the entire system

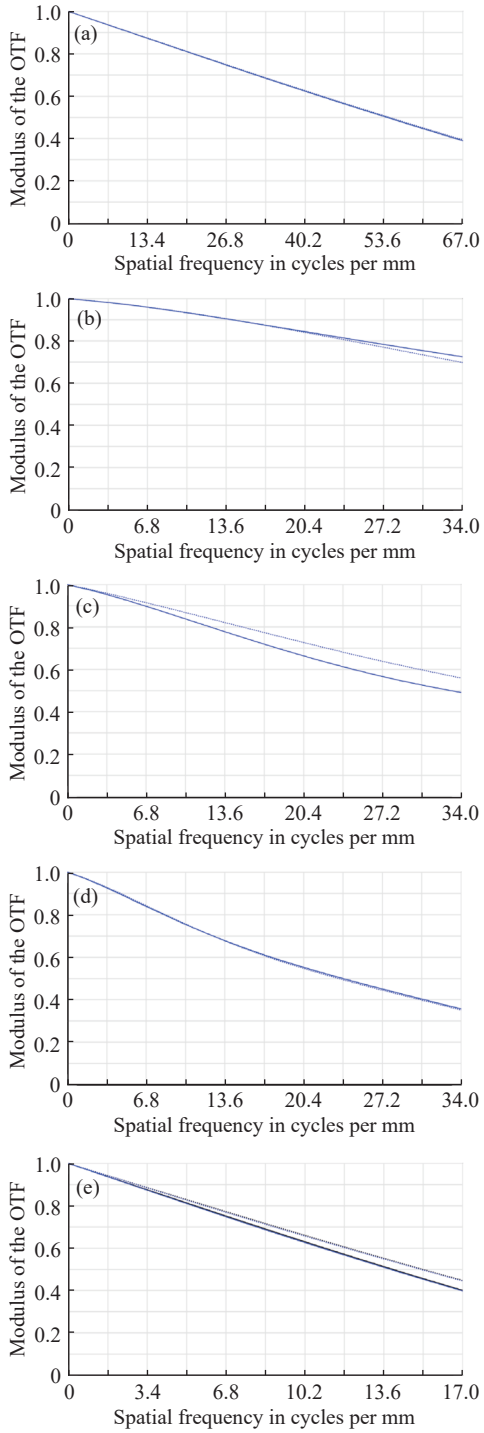


图 9 全系统各波段调制传递函数图。(a) 全色；(b) 可见；(c) 短波；(d) 中波；(e) 长波

Fig. 9 MTF diagram of each spectral band. (a) PAN; (b) VNIR; (c) SWIR; (d) MWIR; (e) LWIR

2.5 背景辐射分析

可见短波谱段主要以地物对太阳光的反射来描述地物的反射特性，而中长波红外谱段则以地物自身的发射信号为主，反映其发射特性。根据普朗克定律，当中长波红外相机的工作温度超过一定值时，光机热辐射将通过系统发生多次反射，

从而在探测器上叠加额外的背景辐射信号。这不仅显著降低了探测器的动态范围, 还大大降低了红外相机的辐射测量精度[14], 文中以等效 300 K 黑体为目标进行了相关分析, 如图 10 所示。

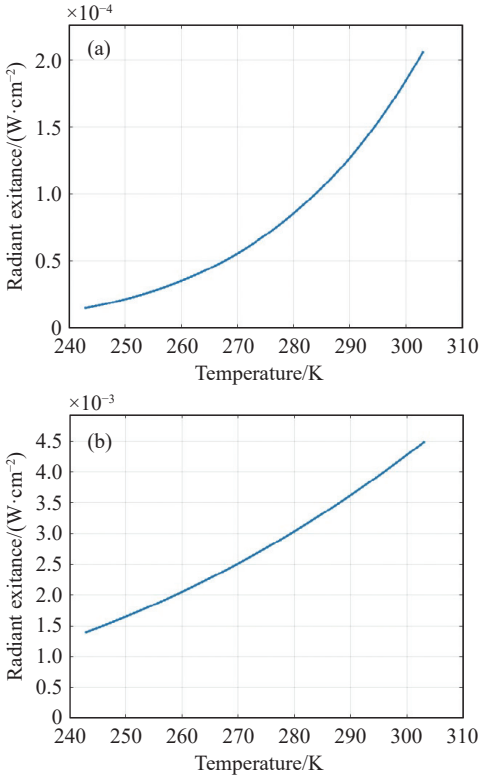


图 10　(a) 3.0~5.0 μm 和 (b) 8.0~12.5 μm 黑体辐射出射度

Fig. 10　Medium and long wave blackbody radiant exitance. (a) 3.0-5.0 μm; (b) 8.0-12.5 μm

随着温度上升, 系统的背景辐射信号呈指数级上升, 因此需要考虑冷光阑的匹配问题。由于凸面光栅结构的特殊性, 难以直接与探测器的杜瓦冷光阑匹配, 通常通过中长波像面处对接二次成像的中继系统来实现冷光阑的匹配[15-16], 如图 11 所示。然而该操作引入的中继成像透镜组不仅增加了系统的复杂性, 还减少了对目标红外辐射信号的获取。此外, 视场内多个透镜所产生的背景辐射影响也不容忽视。探测器接收到的背景辐射信号主要来源于目标视场内系统内表面的直接辐射信号和视场外辐射信号经光机结构多次反射后到达探测器的间接信号, 而冷光阑匹配则可通过辐射传输路径对背景辐射信号进行抑制。

凸面光栅光谱仪成像是通过望远镜系统将沿狭缝方向的探测目标条带成像在狭缝上, 然后经过光谱仪进行分光成像[17]。与冷光阑匹配通过减少辐射传输路径的方式不同, 本文提出将狭缝之后的成像光学部分全部置入低温冷箱中, 同时探测器仍放在低温杜瓦内, 如图 12 所示。这样可在不考虑冷光阑匹配的情况下, 进行整体低温制冷, 能从辐射源的产生上直接减少背景辐射, 降低光学系统的复杂度。

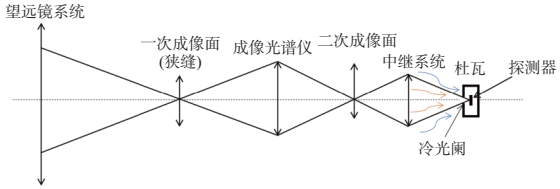


图 11　中继系统与冷光阑匹配结构图

Fig. 11　Matching structure diagram of relay system and cold stop

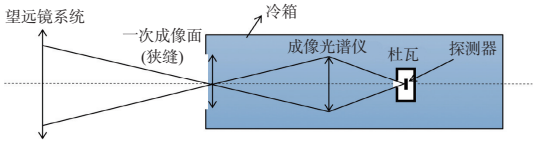


图 12　光谱仪低温光学结构示意图

Fig. 12　Schematic of low temperature structure of the spectrograph

将设计好的光机结构简化后导入 TracePro 进行背景辐射分析, 如图 13 所示。

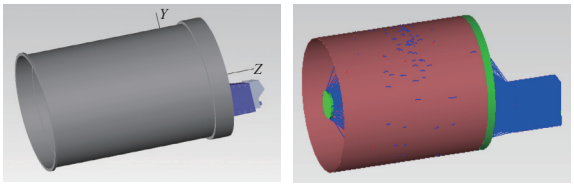


图 13　相机模型及 TracePro 仿真模型

Fig. 13　Camera model and simulation model in TracePro

图中仅显示了部分入射到探测器表面的光线。导入后对系统各表面进行设置。其中:

(1)主、次镜反射面吸收率为 4%, 镜面反射率为 95.8%, 双向反射分布函数 BRDF 为 0.2%;

(2)主镜筒以及反射镜背面及侧面结构吸收率设置为 80%, 反射率为 13%, 双向反射分布函数 BRDF 为 7%;

(3)光谱仪反射面吸收率为 4%, 镜面反射率为 95.8%, 双向反射分布函数 BRDF 为 0.2%;

(4)光谱仪结构件以及背部支撑结构吸收率设置为 80%, 反射率为 13%, 双向反射分布函数 BRDF 为 7%。

背景辐射和温度关系如图 14 所示。

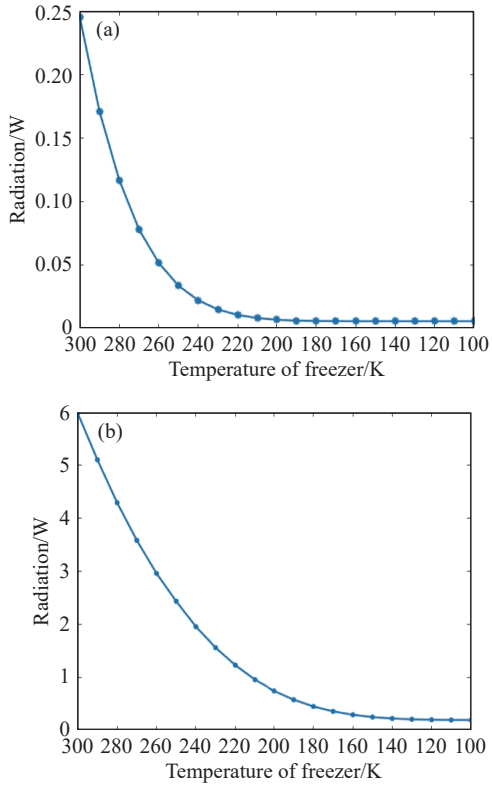


图 14 制冷温度对背景辐射的影响。(a) 中波背景辐射；(b) 长波背景辐射

Fig. 14 Effect of temperature inwall on background radiation. (a) Medium wave background radiation; (b) long wave background radiation

由图 14 可知，随着冷箱温度的降低，入射到探测器表面的背景辐射总量逐渐减少。中波红外系统温度从 300 K 下降到 100 K 的过程中，探测器表面上的背景辐射总量降低速度越来越缓慢，到 200 K 后背景辐射总量基本保持平稳，100 K 时背景辐射总量占目标信号的 0.02%；长波红外系统温度从 300 K 下降到 100 K 的过程中，探测器表面上的背景辐射总量逐渐降低，在 100 K 左右时，长波红外背景辐射总量占目标信号的 0.62%，该方案有效抑制了红外背景辐射。

3 结 论

针对星载全谱段高光谱信息的同步获取需求，本文设计了一种全谱段共口径同轴五反高光谱光学系统，以提升农作物种植检测、林业树种分类和城市多属性观测等小尺度目标的观测能力。该系统所有通道均采用主次镜共用，通过视场分离器将光路分为上、中、下 3 个通道，分别用于全色成像，可见短波高光谱和中长波高光谱成像。高光谱通道利用视场分离器进一步分离谱段，结合凸面光栅光谱仪拼接技术进行分光成像。其中可见短波通道的 F 数为 3.75，中长波通道的 F 数为 2.5，各通道调制传递函数(MTF)接近衍射极限，充分满足高分辨率、大幅宽、全谱段高光谱成像需求。

此外，本文提出将中长波光谱仪整体置于冷箱并实施低温制冷，抑制背景辐射的影响。当冷箱制冷到 100 K 时，中波背景辐射总量占目标信号的 0.02%，长波背景辐射总量占目标信号的 0.62%，有效抑制了背景辐射。这一设计方案为后续探测需求提供了有效的支持，适用于星载对地成像的高光谱系统。

参考文献：

[1] LULLA K, NELLIS M D, RUNDQUIST B, *et al*.. Mission to earth: LANDSAT 9 will continue to view the world[J]. *Geocarto International*, 2021, 36(20): 2261-2263.

[2] WAHBALLAH W A, EL-TOHAMY F, BAZAN T M. A survey and trade-off-study for optical remote sensing satellite camera design[C]. *2020 12th International Conference on Electrical Engineering*, IEEE, 2020: 298-305, doi: 10.1109/ICEENG45378.2020.9171752.

[3] MÜCKE M, SANG B, HEIDER B, *et al*.. EnMAP: hyperspectral imager (HSI) for Earth observation: current status[J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11180: 1118067.

[4] POLZ L, SERDYUCHENKO A, LETTNER M, *et al*.. Setups for alignment and on-ground calibration and characterization of the EnMAP hyperspectral imager[J]. *Proceedings of SPIE*, 2021, 11852: 118526B.

[5] LOIZZO R, GUARINI R, LONGO F, *et al*.. Prisma: the Italian hyperspectral mission[C]. *2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, IEEE, 2018: 175-178, doi: 10.1109/IGARSS.2018.8518512.

[6] TANII J, IWASAKI A, KAWASHIMA T, *et al*.. Results of evaluation model of Hyperspectral Imager Suite (HISUI)[C]. *2012 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, IEEE, 2012: 131-134.

[7] 秦凯玲, 程宇峰, 王密, 等. 高分五号卫星全谱段光谱成像仪在轨几何定标方法及精度验证[J]. 上海航天, 2019,

36(S): 210-218.
QIN K L, CHENG Y F, WANG M, *et al*.. Geometric calibration and precision verification for GF-5 satellite VIMS camera[J]. *Aerospace Shanghai*, 2019, 36(S): 210-218.

[8] 赵艳华, 戴立群, 白绍竣, 等. 全谱段光谱成像仪系统设计及实现[J]. 航天返回与遥感, 2018, 39(3): 38-50.
ZHAO Y H, DAI L Q, BAI SH J, *et al*.. Design and implementation of full-spectrum spectral imager system[J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2018, 39(3): 38-50. (in Chinese).

[9] 夏天, 严薇, 赵英芬, 等. 资源一号 02D 卫星数据应用[J]. 卫星应用, 2021(11): 54-60.
XIA T, YAN W, ZHAO Y F, *et al*.. Application of ZY-1 02D satellite data[J]. *Satellite Applications*, 2021(11): 54-60. (in Chinese).

[10] 陈飚. 资源一号 02E 星[J]. 卫星应用, 2022(2): 70.
CHEN B. ZY-1 02E satellite[J]. *Satellite Applications*, 2022(2): 70. (in Chinese).

[11] 李先怡, 范海生, 潘申林, 等. 珠海一号高光谱卫星数据及应用概况[J]. 卫星应用, 2019(8): 12-18.
LI X Y, FAN H S, PAN S L, *et al*.. Data and application of Zhuhai-1 hyperspectral satellite[J]. *Satellite Application*, 2019(8): 12-18.

[12] 刘银年, 孙德新, 胡晓宁, 等. 高分五号可见短波红外高光谱相机设计与研制[J]. 遥感学报, 2020, 24(4): 333-344.
LIU Y N, SUN D X, HU X N, *et al*.. Development of visible and short-wave infrared hyperspectral imager onboard GF-5 satellite[J]. *Journal of Remote Sensing (Chinese)*, 2020, 24(4): 333-344. (in Chinese).

[13] 胡枫, 丁纬, 阳结根, 等. 超短焦水下广角监控镜头的设计与分析[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(21): 2122002.
HU F, DING W, YANG J G, *et al*.. Design and analysis of ultra-short focal underwater wide angle monitoring lens[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(21): 2122002. (in Chinese).

[14] 姜海勇, 王义坤, 韩贵丞, 等. 中波红外相机光机结构背景辐射影响研究[J]. 激光与红外, 2016, 46(9): 1102-1105.
JIANG H Y, WANG Y K, HAN G CH, *et al*.. Influence of optical-mechanical structure background radiation in MWIR camera[J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(9): 1102-1105. (in Chinese).

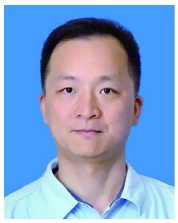
[15] 马健, 张军强, 吴从均, 等. 全谱段高光谱成像仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2022, 42(23): 2322001.
MA J, ZHANG J Q, WU C J, *et al*.. Optical system design of full-spectrum hyperspectral imaging spectrometer[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(23): 2322001. (in Chinese).

[16] 贾文波, 秦天翔, 黄蕴涵, 等. 红外双波段成像光谱仪光学系统的设计与分析[J]. 中国激光, 2021, 48(23): 2311002.
JIA W B, QIN T X, HUANG Y H, *et al*.. Design and analysis of optical system of an infrared dual-band imaging spectrometer[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(23): 2311002. (in Chinese).

[17] 刘玉娟, 崔继承, 巴音贺希格, 等. 凸面光栅成像光谱仪的研制与应用[J]. 光学 精密工程, 2012, 20(1): 52-57.
LIU Y J, CUI J CH, BAYANHESHIG, *et al*.. Design and application of imaging spectrometer with convex grating[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(1): 52-57. (in Chinese).

作者简介:

吴　寅(1998—), 男, 贵州遵义人, 博士研究生, 2020 年于电子科技大学获得学士学位, 主要从事光学设计方面的研究。E-mail: wuyin20@mails.ucas.ac.cn



王跃明(1977—), 男, 安徽黄山人, 博士, 研究员, 博士生导师, 2005 年于中国科学院上海技术物理研究所获得工学博士学位, 主要从事红外与光谱信息获取方法研究及相关仪器研制。E-mail: wangym@mail.sitp.ac.cn