Vol. 53, No. 11 November, 2023

文章编号:1001-5078(2023)11-1750-07

·光学技术 ·

星载红外双谱段高光谱成像仪光学系统设计

王保华^{1,2},姜会林²,唐绍凡¹,张绪国¹,李 阳¹,封宇航¹ (1. 北京空间机电研究所,北京 100094;2. 长春理工大学光电工程学院,吉林 长春 130022)

摘 要:针对国内外星载红外高光谱成像数据空白和迫切应用需求,本文提出了星载红外双谱段 高光谱成像技术方案,实现高空间分辨率、高光谱分辨率和高温度灵敏度成像。工作谱段覆盖中 波红外(3~5 μm)和长波红外(8~12.5 μm),中波和长波红外谱段的光谱分辨率分别为 50 nm 和 100 nm,空间分辨率为 60 m,成像幅宽为 60 km,噪声等效温差优于 0.2 K。分析确定了红外高 光谱成像仪的光学系统技术指标,设计了望远光学系统、光谱成像光学系统和高光谱成像仪整体 光学系统。望远光学系统采用自由曲面离轴三反设计方案,实现了大相对孔径像方远心和低畸 变设计,相对畸变小于 0.135 %;光谱成像光学系统采用 Wynne-Offner 结构形式,实现了高成像 质量、轻小型化设计,不同波长的传函均接近衍射极限。设计结果表明,星载红外双谱段高光谱 成像仪的光学系统成像质量优良,结构布局紧凑合理,具有较强的工程应用价值。 关键词:光学遥感;高光谱成像;红外双谱段;光学系统设计

中图分类号:0439;TH743 文献标识码:A DOI:10.3969/j.issn.1001-5078.2023.11.019

Optical system design of spaceborne dual-band infrared hyperspectral imager

WANG Bao-hua^{1,2}, JIANG Hui-lin², TANG Shao-fan¹, ZHANG Xu-guo¹, LI Yang¹, FENG Yu-hang¹ (1. Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China;

2. School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: Aiming at the blank and urgent application needsof infrared hyperspectral imaging data, aspacebornedualband infrared hyperspectral imaging scheme is proposed to obtain images with high spatial resolution, high spectral resolution and high temperature sensitivity. The working spectrum covers $3 \sim 5\mu m$ (MWIR) and $8 \sim 12.5 \mu m$ (LWIR). The spectral resolution of MWIR and LWIR is 50 nm and 100 nm, respectively. The spatial resolution is 60 m, the imaging width is 60km, and the noise equivalent temperature differencesis less than 0.2 K. In this paper, the optical system specifications of the spaceborne dual-band infraredhyperspectral imagerare analyzed and determined. Moreover, the telescope optical system, the spectral imaging optical system and the overall optical system are designed. The off-axis three-mirror design schemewithfree-form surface is adopted in the telescope optical system to realize the design of low distortion and high telecentricity under large relative aperture. The relative distortion of the telescope optical systemis less than 0.135 %. The Wynne-Offner structure is used in the spectral imaging optical system to achieve the design of high imaging quality, low smile and keystone. The MTF of the spectral imaging optical system is close to the diffraction limit under different wavelengths. The design results show that the optical system of thespacebornedual-band infraredhyperspectral imager has excellent imaging quality and reasonable structural layout that has strong engineering application value.

Keywords: remote sensing; hyperspectral imaging; dual-band infrared; optical system design

收稿日期:2022-10-28;修订日期:2022-12-30

作者简介:王保华(1988 -),男,硕士,高级工程师,主要从事空间光学遥感器总体和光学系统设计技术的研究。E-mail: wangbaohua508@163.com

1 引 言

高光谱成像仪将成像技术与光谱技术相结合, 可以同时获取被测目标的空间信息、辐射信息和光 谱信息,成为光学遥感仪器的重要发展方向^[1]。红 外高光谱成像数据在地表温度精确反演、煤火监测、 旱灾监测、城市热岛效应、污染气体探测以及矿物探 测等方面具有独特的优势,具有十分迫切的应用需 求^[2]。目前,国外在轨和在研的高光谱成像仪主要 有 Hyperion^[3]、COIS^[4]和 HyspIRI^[5]等,我国近年来 也相继成功研制了搭载于"天宫一号"、"环境减灾 卫星 1A/B" 和"高分五号" 卫星的高光谱成像 仪^[6~8],但在国内外在轨和在研的高光谱成像仪中, 除了 HyspIRI 以外的其他高光谱成像仪工作谱段均 为可见光和短波红外, HyspIRI 的工作谱段虽然覆 盖了中波和长波红外,但谱段数量仅有6个,光谱带 宽大于 320 nm, 无法获取高光谱分辨率成像数据。 我国在高分五号卫星上配置了一台全谱段光谱成像 仪,工作谱段包括两个中波红外谱段和四个长波红 外谱段,也只能获取红外多光谱成像数据。针对国 内外星载红外高光谱成像数据空白和强烈应用需 求,本文提出了星载红外双谱段高光谱成像方案,中 波红外谱段范围为3~5 µm,长波红外谱段范围为 8~12.5 µm,中波红外和长波红外的光谱分辨率分 别为 50 nm 和 100 nm, 空间分辨率为 60 m, 成像幅 宽为 60 km, 中波红外和长波红外谱段的噪声等效 温差(NEDT)均优于 0.2 K。星载红外双谱段高光 谱成像仪的空间分辨率与 HyspIRI 和"高分五号"卫 星全谱段光谱成像仪相同,但谱段数量增加了十几 倍,可以同时实现高空间分辨率和高光谱分辨率遥 感数据获取。本文分析了星载红外双谱段高光谱成 像仪的噪声等效温差,根据成像性能、光学调制传递 函数(MTF)等确定了光学系统技术指标,优化设计 了高光谱成像仪光学系统,望远光学系统采用离轴 三反设计方案,并使用自由曲面实现了大相对孔径、 低畸变像方远心设计;光谱成像系统采用 Wynne-Offner 结构形式,实现了高成像质量、轻小型化设 计。设计结果表明,星载红外双谱段高光谱成像仪 光学系统的成像质量接近衍射极限,结构布局紧凑 合理,具有较强的工程应用价值。

2 红外高光谱成像仪光学系统指标分析

为了方便红外高光谱成像数据与红外多光谱成

像数据进行对比,同时便于红外高光谱成像数据与 可见光短波红外高光谱成像数据的融合使用,星载 红外双谱段高光谱成像仪的指标设置参考"高分五 号"卫星可见短波红外高光谱相机和全谱段光谱成 像仪,工作轨道高度与"高分五号"卫星保持一致, 均为705 km,空间分辨率和成像幅宽与全谱段光谱 成像仪相同,分别为60m和60km,工作谱段为3~ 5 μm 和 8~12.5 μm, 完全覆盖全谱段光谱成像仪 的红外工作谱段范围,中波红外和长波红外的光谱 分辨率分别为 50 nm 和 100 nm, 谱段数量分别为 40 个和45个。星载红外双谱段高光谱成像仪可以同 时实现高空间分辨率和高光谱分辨率成像数据获 取,填补国内外星载红外高光谱成像数据的空白,满 足地表温度精确反演、煤火监测、旱灾监测、城市热 岛效应、污染气体探测以及矿物探测等领域的迫切 应用需求。

星载红外双谱段高光谱成像仪的光学系统技术 指标主要包括焦距、视场角、相对孔径、光谱分辨率 和狭缝长度等,需根据高光谱成像仪的整体成像要 求来确定。星载红外双谱段高光谱成像仪选用国产 红外面阵器件,像元规模 1024 × 256,像元尺寸 24 μm×32 μm,根据探测器的像元尺寸、轨道高度、 空间分辨率和幅宽等可计算得到高光谱成像仪光学 系统的焦距为 282 mm,成像视场角为 4.88°,取 4.9°进行设计;根据探测器规模、焦距和视场角等确 定星载红外双谱段高光谱成像仪光学系统的狭缝长 度为 24.576 mm,狭缝宽度为 32 μm。

光学系统的相对孔径(D/f')直接影响红外高光 谱成像仪的噪声等效温差和调制传递函数,同时还 决定系统的体积和工程研制难度,因此,合理选择光 学系统的相对孔径是实现高性能高光谱成像的 基础。

红外高光谱成像仪的噪声等效温差由轨道高度、空间分辨率、光谱分辨率以及探测器、光学系统和电子学系统的性能等因素决定,噪声等效温差计算方法为^[9]:

$$NETD = \frac{4 \sqrt{A_d \cdot \Delta f} \cdot F^2}{\left(\frac{dM}{dT}\right)_T \cdot A_d \cdot \tau \cdot D^* \cdot \delta}$$
(1)

式中,A_a、D^{*}、Δf分别为探测器像元面积、归一化探 测率和等效噪声带宽,根据探测器手册确定;τ为光 学系统透过率,根据光学元件反射率和透过率计算 得到; $\left(\frac{dM}{dT}\right)_{T}$ 为对于温度为T的黑体单位温度变化 引起的辐出射度变化值,根据黑体温度计算得到; δ 为工程因子,与工程研制经验相关;F为光学系统相 对口径(D/f')的倒数,需根据成像光谱仪的信噪比 要求优化确定。

由于中波红外和长波红外谱段辐射能量的差 异,中波红外谱段更容易实现较高的噪声等效温差, 因此,中波红外谱段光谱成像系统可以选取相对较 小的光学系统相对孔径,有利于减小光学系统的体 积和重量,而长波红外谱段光谱成像系统则必须选 取大相对孔径光学系统来提高能力收集能力,从而 实现较高的噪声等效温差。当中波和长波红外谱段 的光学系统相对孔径分别为 *D/f* = 1/3 和 *D/f* = 1/ 2.4 时,将其他参数代入式(1),分别计算得到工作 谱段范围内的噪声等效温差曲线如图 1(a)和图 1 (b)所示,中波和长波红外谱段的噪声等效温差均 优于 0.2 K,满足多个领域对高温度灵敏度、高光谱 红外成像数据的应用需求。



infrared hyperspectral imager

当中波和长波红外谱段的光学系统相对孔径分 别为 D/f² = 1/3 和 D/f² = 1/2.4 时,5 μm 波长在奈 奎斯特频率(20.8 lp/mm)处的调制传递函数衍射 极限高于 0.6,12.5 μm 波长在奈奎斯特频率(20.8 lp/mm)处的调制传递函数衍射极限高于 0.28,综合 考虑光学设计、加工、装调、电子线路以及探测器等 因素,红外高光谱成像仪的静态传函预估均高于 0.12,可以满足应用需求。

因此,综合考虑噪声等效温差和调制传递函数 要求后,最终确定星载红外双谱段高光谱成像仪的 光学系统技术指标汇总见表1。

> 表1 星载红外双谱段高光谱成像仪 光学系统技术指标

Tab. 1 Specifications of space borne dual-band infrared hypers pectral imager

| Technical parameters | Values |
|------------------------|--------------------------|
| Spectrum/µm | 3~5(MWIR) |
| | 8 ~ 12. 5 (LWIR) |
| Spectral resolution/nm | 50(MWIR) |
| | 100(LWIR) |
| Field of view/(°) | 4.9 |
| Focal length/mm | 282 |
| Relative Aperture | 1/3(MWIR) |
| | 1/2.4(LWIR) |
| Detector pixel size/µm | 24 × 32 |
| Slit size | 24. 576 mm × 32 μm(MWIR) |
| | 24. 576 mm × 32 μm(LWIR) |

3 红外高光谱成像仪光学系统设计

高光谱成像仪的光学系统由望远光学系统和光 谱成像光学系统两部分组成,望远光学系统的作用 是将地物目标成像到狭缝处,光谱成像光学系统的 作用是将狭缝像色散分光后再次成像到探测器上。 望远光学系统和光谱成像光学系统满足光瞳匹配原 则,可以分别进行设计和成像质量评价,并通过狭缝 连接成全系统^[10]。

3.1 望远光学系统设计

望远光学系统在设计时需要重点考虑成像质量 和像方远心度的要求^[11],如果望远光学系统的成 像质量较差,不仅会降低高光谱成像仪的光谱分 辨率,还会增加高光谱成像数据的几何畸变校正 工作量,影响光谱数据的快速处理和应用;如果望 远光学系统的像方远心度较差,将导致望远光学 系统与光谱成像光学系统的匹配度下降,系统产 生较大的渐晕,降低高光谱成像仪的调制传递函 数和信噪比,因此,合理选择初始结构是保证光学 系统实现指标要求和成像要求的重要环节。星载 红外双谱段高光谱成像仪的工作谱段覆盖中波和 长波红外,口径和相对孔径均较大,望远光学系统 选用离轴三反作为初始结构不仅可以实现中波和 长波红外一体化成像,而且有利于满足成像质量 和像元远心度的要求。

自由曲面相比球面和非球面具有更多的设计自 由度,有利于校正光学系统的轴外像差,尤其有利于 降低离轴光学系统的畸变。随着自由曲面加工和检 测水平的不断提高,自由曲面也越来越多地应用到 成像光学系统中^[12-13]。为了提高光学系统传函、减 小系统畸变和提升像方远心度,星载红外双谱段高 光谱成像仪的望远光学系统用自由曲面代替了传统 的球面或非球面反射镜,优化设计后的自由曲面离 轴三反望远光学系统如图 2 所示,系统体积仅为到 156 mm×265 mm×205 mm(*X*×*Y*×*Z*),实现了望 远光学系统的轻小型化设计。

望远光学系统在全视场范围内的调制传递函数 曲线如图 3 所示,各视场在奈奎斯特频率处的调制 传递函数均接近衍射极限。





Fig. 2 Off-axis three-mirror free-form optical system of telescope 望远光学系统的畸变如图 4 所示,在成像视场 范围内的最大相对畸变为 0.135 %,较小的畸变有 利于光谱成像数据的快速处理和应用。



Fig. 4 Distortion curve of telescope optical system

望远光学系统的像方远心度通常用边缘视场主 光线在像面的出射角度进行评价,出射角度越小,表 明望远光学系统的像方远心度越高。经分析,望远 光学系统的边缘视场主光线在像面的出射角度仅为 0.51°,像方远心度高有利于望远光学系统与后续光 谱成像光学系统的良好匹配。

3.2 光谱成像光学系统设计

20世纪80年代后期,美国的KwoD等人提出 了基于凸面光栅的Offner光谱成像光学系统^[14],该 系统具有结构简单紧凑、体积小、成像性能好等优 点,非常适合用于高光谱分辨率、小型化成像光谱 仪,并在Hyperion、COIS和HyspIRI等星载高光谱成 像仪中得到了应用和验证。为了扩大Offner光谱成 像系统的成像视场,Wynne提出了Wynne-Offner结 构形式,通过在凸面镜前加入同心弯月透镜来校正 球差,具有狭缝长、结构紧凑、成像质量优、光谱畸变 小的特点^[15]。星载红外双谱段高光谱成像仪光学 系统的相对孔径较大,为了提高光谱成像系统的成 像质量,同时为了减小光谱成像系统的体积来降低低温制冷功耗,光谱成像系统应采用 Wynne-Offner结构形式。经过优化设计,最后设计的中波和长波红外光谱成像光学系统如图 5 所示,中波红外光谱成像光学系统的体积为 66 mm × 88 mm × 105 mm $(X \times Y \times Z)$,中波红外光谱成像光学系统的体积为 90 mm × 140 mm × 145 mm $(X \times Y \times Z)$ 。







Fig. 5 The Wynne-Offner spectral imaging optical system 光谱成像光学系统在不同波长下的调制传递函

为信成家儿子亲纪在不问彼长下的词前传递函数曲线如图6所示,各波长在成像视场范围的调制 传递函数均接近衍射极限,满足高性能光谱成像 要求。





3.3 整体光学系统设计

把望远光学系统和光谱成像光学系统通过狭缝连接在一起,形成星载红外双谱段高光谱成像仪整体光学系统如图7所示,整体系统体积仅为156mm×395mm×390mm(X×Y×Z),结构布局合理紧凑,有利于实现星载红外双谱段高光谱成像仪的轻小型化设计。





星载红外双谱段高光谱成像仪整体光学系统不同波长的调制传递函数曲线如图 8 所示,3 μm 波长 在奈奎斯特频率(20.8 mm/lp)的调制传递函数大于 0.7,12.5 μm 波长在奈奎斯特频率(20.8 mm/lp)的 调制传递函数大于 0.28,成像质量优良。



Fig. 8 MTF curves of the whole optical system

4 结 论

国内外已研制了多台工作谱段覆盖可见光近红 外和短波红外的高光谱成像仪,但尚未实现中波和长 波红外高光谱成像仪的星载工程应用,为了填补国内 外中波和长波红外星载高光谱成像数据的空白,针对 地表温度精确反演、煤火监测、旱灾监测、城市热岛效 应、污染气体探测以及矿物探测等领域的迫切应用需 求,本文提出了星载中波和长波红外双谱段高光谱成 像方案,同时获取高空间分辨率、高光谱分辨率和高 温度灵敏度的红外成像数据。为了便于与已有的红 外多光谱和可见光 - 短波红外高光谱数据进行融合 使用,星载红外双谱段高光谱成像仪的技术指标参照 XX 可见短波红外高光谱相机和全谱段光谱成像仪, 谱段范围覆盖 3~5 μm 和 8~12.5 μm,空间分辨率 和成像幅宽分别为60m和60km,中波红外和长波红 外的光谱分辨率分别为50 nm 和100 nm,噪声等效温 差优于0.2 K。完成了星载红外双谱段高光谱成像仪 光学系统技术指标分析和优化设计,望远光学系统采 用自由曲面离轴三反设计方案实现红外双谱段一体 化设计,畸变小、像方远心度高;光谱成像系统采用 Wynne-Offner 结构形式实现高成像质量、轻小型化设 计;整体光学系统结构布局紧凑合理,成像质量优良, 具有较强的工程应用价值。

参考文献:

 Zhang Chunmin, Mu Tingkui, Yan Tingyu, et al. Overview of hyperspectral remote sensing technology[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2018, 39(3):104 - 114. (in Chinese)

> 张淳民,穆廷魁,颜廷昱,等.高光谱遥感技术发展与 展望[J].航天返回与遥感,2018,39(3):104-114.

 Wang Jianyu, Li Chunlai, Ji Hongzhen, et al. Status and prospect of thermal infrared hyperspectral imaging technology[J]. J. Infrared Millil. Waves, 2015, 34(1):51 – 59. (in Chinese)

王建宇,李春来,姬弘桢,等. 热红外高光谱成像技术的研究现状与展望[J]. 红外与毫米波学报,2015,34 (1):51-59.

- Pearlman J, SegalC, Lushalan L, et al. Development and operations of the EO-1 hyperion imagingspectrometer[J].
 SPIE, 2004, 4135:243 – 253.
- [4] Davis C. Application of hyperspectral imaging in the coastal ocean[J]. SPIE, 2002, 4816:33 - 41.

- [5] Christine ML, Morgan L, Simon J, et al. An introduction to the NASA hyperspectralinfra redimager(HyspIRI) mission andpreparatory activities[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 167:6-19.
- [6] Wang Yaoming, Lang Junwei, Wang Jianyu. Status and prospect of space-borne hyperspectral imaging technology
 [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2013, 50:01008 –
 1 8. (in Chinese)

王跃明,郎均慰,王建宇. 航天高光谱成像技术研究现状与展望[J]. 激光与光电子学进展,2013,50:01008-1-8.

- [7] Bai Zhaoguang. In-orbit movement and review of environment and disaster monitoring and forecasting small satellite constellation A and B small satellites [J]. Spacecraft Engineering, 2018, 27(6):11-18. (in Chinese)
 白照广. 环境与灾害监测预报小卫星星座 A/B 卫星运行与发展展望[J]. 航天器工程, 2018, 27(6):11-18.
- [8] Liu Yinnian. Visible-shortwave infrared hyperspectral imager of GF-5 Satellite[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2018, 39(3):25-28. (in Chinese)
 刘银年."高分五号"卫星可见短波红外高光谱相机的 研制[J]. 航天返回与遥感, 2018, 39(3):25-28.
- [9] Wang Yifeng, Tan Ji. On the noise equivalent temperature difference of infrared detection system [J]. Infrared, 2014,35(6):1-9. (in Chinese)
 王忆锋,谈骥.论红外探测系统的噪声等效温差[J]. 红外,2014,35(6):1-9.
- [10] Wang Baohua, Ruan Ningjuan, Guo Congling, et al. Optical system design of airborne light and compact highresolutionimaging spectrometer[J]. Acta Optica Sinica, 2015, 35(10):1022001. (in Chinese)

王保华,阮宁娟,郭崇岭,等. 机载轻小型高分辨率成 像光谱仪光学系统设计[J]. 光学学报, 2015, 35 (10):1022001.

- [11] Wang Baohua, Li Ke, Tang Shaofan, et al. Optical system design of spaceborneimaging spectrometer with high resolution and super-swatch [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2021, 42(1):92 99. (in Chinese) 王保华,李可,唐绍凡,等. 高分辨率超大幅宽星载成 像光谱仪光学系统设计[J]. 航天返回与遥感, 2021, 42(1):92 - 99.
- [12] Liu Lu, Hu Bin, Zhou Feng, et al. Design of compact offaxis four-mirror optical system with two-dimensional large field of view[J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2020,41(1):73-84. (in Chinese) 刘璐,胡斌,周峰,等. 二维大视场紧凑型离轴四反光 学系统设计[J]. 航天返回与遥感, 2020,41(1): 73-84.
- [13] Yangtong, Duan Yingze, Chen Dewen, et al. Freeforme imaging optical system design: theories, development and applications[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(1):115 143. (in Chinese)
 杨通,段璎哲,程德文,等. 自由曲面成像光学系统设计:理论、发展与应用[J]. 光学学报, 2021, 41(1): 115 143.
- [14] Kwo D, Lawrence G, Chrisp M. Design of agrating spectrometer from a 1:1 Offner mirror system[J]. Spie 1987, 818:275 - 279.
- [15] Prieto-Blanco X, Fuente R D. Compact offner-wynne imaging spectrometers[J]. Optics Communications, 2014, 328 (10):143-150.