

全谱段高光谱成像仪光学系统设计

马健^{1,2}, 张军强^{1,3*}, 吴从均^{1**}, 李鑫权^{1,2}, 卢天姣^{1,2}, 杨斌³¹中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130031;²中国科学院大学, 北京 101400;³长光禹辰信息技术与装备(青岛)有限公司, 山东 青岛 260000

摘要 为满足全谱段高光谱成像探测一体化应用需求,开展了可见至长波红外(LWIR)共口径成像光谱仪光学设计。前置像方远心物镜采用离轴三反结构实现,利用视场分离分光和分色片分光相结合的方法实现了可见至 LWIR 的四谱段划分。后置光谱仪采用非对称式凸面光栅 Offner 结构,将中波红外(MWIR)与 LWIR 光谱仪的放大率设置为 0.90 和 0.61,以满足设计指标和成像质量的要求。设计和分析结果表明:所提系统在 600 km 轨道高度处的幅宽为 30 km;可见至短波红外(SWIR)的 F 数为 2.6,可见/近红外(VNIR)光谱分辨率和 SWIR 光谱分辨率分别优于 5 nm 和 10 nm,像元分辨率为 30 m;MWIR 谱段和 LWIR 谱段的 F 数分别达到 2.3 和 1.5,光谱分辨率分别优于 50 nm 和 100 nm,像元分辨率分别为 50 m 和 74 m;各谱段在 Nyquist 频率处的调制传递函数(MTF)均接近衍射极限,谱线弯曲和色畸变均小于探测器像元尺寸的 1/10。

关键词 光学设计; 成像光谱仪; 全谱段; 远心离轴三反; Offner; 像质分析

中图分类号 O439

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.2322001

Optical System Design of Full-Spectrum Hyperspectral Imaging Spectrometer

Ma Jian^{1,2}, Zhang Junqiang^{1,3*}, Wu Congjun^{1**}, Li Xinquan^{1,2}, Lu Tianjiao^{1,2}, Yang Bin³¹Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130031, Jilin, China;²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 101400, China;³Yusense Information Technology and Equipment (Qingdao) Inc., Qingdao 260000, Shandong, China

Abstract In order to meet the integrated application requirements of full-spectrum hyperspectral imaging and detection, this paper designs a visible-to-long-wave infrared (LWIR) co-aperture imaging spectrometer. The front image square telecentric objective is realized by an off-axis three-mirror structure, and the spectrum is divided into four segments by the field of view separation and beam splitter. The post spectrometer adopts an Offner structure with asymmetric convex grating, and the magnifications of the middle-wave infrared (MWIR) and LWIR spectrometers are set to 0.90 and 0.61, so as to meet the requirements of design specification and imaging quality. The design and analysis results show that the proposed system achieves a ground coverage width of 30 km at an orbital height of 600 km. The F number of visible spectral band to short-wave infrared (SWIR) spectral band is 2.6, and resolutions of visible/near infrared (VNIR) and SWIR are better than 5 nm and 10 nm, respectively, with a pixel resolution of 30 m. The F number of the MWIR and LWIR spectral bands is 2.3 and 1.5, respectively, and their spectral resolutions are better than 50 nm and 100 nm, with a pixel resolution of 50 m and 74 m. The modulation transfer function (MTF) of each spectral band is close to the diffraction limit at the Nyquist frequency, and the spectral line curvature and color distortion are less than 1/10 of the detector's pixel size.

Key words optical design; imaging spectrometer; full spectrum; telecentric off-axis three mirrors; Offner; image quality analysis

收稿日期: 2022-04-01; 修回日期: 2022-05-17; 录用日期: 2022-06-08

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(61875192)

通信作者: *zhangjq@ciomp.ac.cn; **wucongjun@ciomp.ac.cn

1 引言

高光谱成像技术可同时获取地物的几何、辐射和光谱信息,集相机、辐射计和光谱仪能力于一体,可对地物进行空间和光谱三维成像。在一定的空间分辨率下,高光谱成像技术可获取宽谱段范围内地物独特的连续特征光谱^[1],对地物的精细分类和识别具有突出优势,目前已成为对地遥感的重要技术手段^[2]。

国外典型的星载近地轨道高光谱成像系统主要有日本的 HISUI^[3](波段范围为 0.4~2.5 μm)、意大利的 PRISMA^[4](波段范围为 0.4~2.5 μm)、德国的 EnMAP^[5-6](波段范围为 0.42~2.45 μm)和美国的 HypIRI^[7](预计 2023 年发射,波段范围为 0.38~2.50 μm),国内主要为 GF-5 卫星搭载的可见短波红外高光谱相机^[8](波段范围为 0.4~2.5 μm)。现阶段已投入应用及在研的星载近地轨道高光谱成像系统波段范围大多仅覆盖可见/近红外(VNIR)和短波红外(SWIR)谱段,大多无法获取中波红外(MWIR)和长波红外(LWIR)谱段范围内的光谱信息^[9]。为了进一步拓宽高光谱的成像谱段,现有高光谱成像系统大多通过多套单一波段的成像光谱仪器搭载到同一平台上

实现,具有结构冗余、体积较大和过多占用卫星平台资源等缺点。由于不同用户对目标光谱信息要求的多样化、地物更丰富的光谱信息的获取需求,以及全天时的地物反射和发射光谱特征的获取需求,故共口径全谱段成像光谱仪的研究具有重要的工程意义^[10]。

在进行全谱段成像光谱仪器设计时,需要根据各个波段探测器性能参数进行仪器光学系统参数确定。对各波段进行合理的分光处理,以保证高信噪比。另外,各谱段成像图像之间的地物信息一致,可有效保证后续各个波段图像之间的配准精度。因此,本文将从应用需求、谱段划分方式和光谱仪设计等方面,结合共口径光学系统的特点,对全谱段高光谱成像仪光学系统进行优化设计,并对结果进行详细分析和解释。

2 全谱段高光谱成像仪应用指标分析

全谱段高光谱成像仪的工作轨道高度为 600 km,地面覆盖宽度要求达到 30 km,前置望远系统的焦距为 400 mm,总视场为 2.864°。为提高各谱段信噪比,将前置望远系统的 F 数设定为 2.6。根据应用需求、信噪比和成像质量等各方面因素,计算得到光学系统的主要技术指标和各谱段探测器参数,如表 1 所示。

表 1 光学系统的主要技术指标
Table 1 Technical specifications of optical system

Specification	VNIR	SWIR	MWIR	LWIR
Spectral range /μm	0.4~1.0	1.0~2.5	3.0~5.0	8.0~12.5
Field of view /(°)	2.864	2.864	2.864	2.864
Focal length /mm	400	400	360	244
Detector pixel size / (μm×μm)	20×20	20×20	30×30	30×30
Number of spatial dimension pixels	1024	1024	640	640
Spectral resolution /nm	5	10	50	100
Pixel resolution /m	30	30	50	74

3 光学系统设计

3.1 光学系统设计总体方案

成像光谱仪光学系统一般包括前置望远成像系统和后置光谱成像系统。对于前置望远系统,结构通常有透射式、折反式和反射式。该系统波段范围为 0.4~12.5 μm,相比于透射式和折反式,离轴反射式结构具有无色差、适用于宽波段、受环境温度变化影响较小、无中心遮拦和平像场等优点,故采用离轴三反结构作为像方远心望远物镜。与传统准直光束中使用光栅或棱镜的方法相比,凸面光栅 Offner 光谱仪结构具有体积小、质量轻、色散均匀、谱线弯曲和色畸变小等优点^[11],故非常适合于空间应用。

共口径前置望远系统的设计难点在于如何实现可见/近红外、短波红外、中波红外和长波红外四谱段的高质量划分。通常可见至短波红外高光谱成像系统只需实现可见/近红外与短波红外两谱段的划分,主要通过视场分离分光或者分色片分光实现。然而,本系统

需要实现四谱段划分,故在望远物镜后端拟采用视场分离分光与分色片分光相结合的方法实现。分色片分光的方法与视场分离分光相比,存在 10%~20% 的能量损失^[12],这会降低光谱仪的信噪比,特别对中波红外和长波红外谱段的影响较大,故在综合考虑设计难度与成像质量要求的情况下,在离轴三反系统中设置了三个离轴视场,即离轴视场 1(FOV 1)、离轴视场 2(FOV 2)和离轴视场 3(FOV 3)。如图 1 所示,入射光通过前置望远系统,经视场分离分光,实现三个视场的分离,FOV 1 出射光通过狭缝后经分色片分谱段,分别进入可见/近红外和短波红外谱段光谱仪,FOV 2 出射光和 FOV 3 出射光分别进入长波红外和中波红外谱段光谱仪中。

对于后置光谱仪系统,为达到设计幅宽和各谱段像元分辨率,在共用前置望远系统的情况下各谱段需要达到不同的焦距,一般采用加入中继系统的方法来改变不同谱段光学系统的焦距^[13]。同时,在中长波红外谱段光谱仪与前置望远系统光瞳匹配的条件下,为

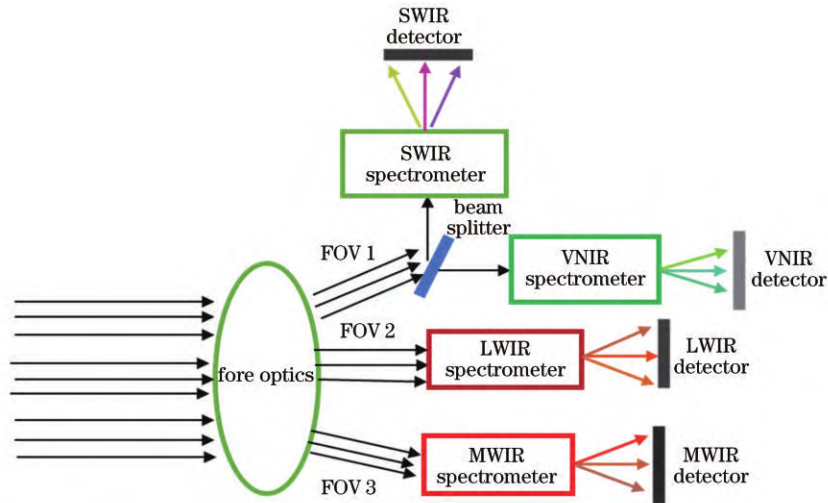


图 1 光学系统设计方案

Fig. 1 Design scheme of optical system

实现高质量成像应尽可能减小其 F 数。前置望远系统需要对接 4 个 Offner 光谱仪,故采用该方法会增加全系统的体积,占用过多的布局空间。本文采用改变 Offner 凸面光栅光谱仪的放大率来获得各谱段不同焦距的方法,通过计算,若要达到中波红外组合系统的焦距为 360 mm,长波红外组合系统的焦距为 244 mm 的要求,则需分别设计放大率为 0.90 和 0.61 的中/长波红外光谱仪。所设计光学系统不仅达到了设计幅宽和像元分辨率,保证了地面图像配准时的一致性,而且没有增加多余结构,并使中、长波红外谱段 F 数分别达到 2.3、1.5。

3.2 离轴三反像方远心物镜设计

3.2.1 初始结构参数求解

离轴三反望远系统以同轴三反望远系统为基础,如图 2 所示。共轴三反系统的焦距为 f' ,三个反射镜[主镜(M_1)、次镜(M_2)和三镜(M_3)]的顶点曲率半径分

别为 R_1 、 R_2 和 R_3 , M_1 与 M_2 间隔为 d_1 , M_2 与 M_3 间隔为 d_2 , M_3 与像面的间隔为 d_3 。根据几何光学成像理论,各参数^[14]的表达式为

$$R_1 = 2f', \quad (1)$$

$$R_2 = \frac{2\alpha_1 f'}{1 + \alpha_1}, \quad (2)$$

$$R_3 = 2\alpha_1 f', \quad (3)$$

$$d_1 = (1 - \alpha_1) f', \quad (4)$$

$$d_2 = -\alpha_1 f', \quad (5)$$

$$d_3 = (1 + \alpha_1) \alpha_1 f', \quad (6)$$

式中: α_1 和 β_1 为 M_2 对 M_1 的遮拦比和放大率; α_2 和 β_2 为 M_3 对 M_2 的遮拦比和放大率。为方便计算,将 α_1 设为 0.5,即 $d_1 = -d_2$ 。最后,根据三级像差理论,令三反系统的三级球差 S_I 、彗差 S_{II} 和像散 S_{III} 全部为零,此时即可求出三反系统的全部初始结构参数。

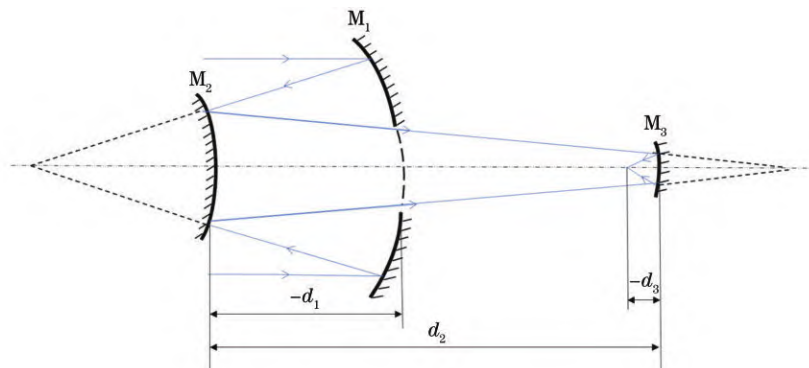


图 2 同轴三反结构

Fig. 2 Coaxial three-mirror system

3.2.2 光学系统优化过程及结果

在得到初始结构后,采用视场离轴方法设计,离轴视场分别为 -9.3° (FOV 1)、 -9.0° (FOV 2)和 -8.7° (FOV 3),三像面视场方向错开约 2.2 mm。利用光学

设计软件的多重组态功能,设计参数如表 2 所示。

在初次优化时,为使前置望远系统与各谱段光谱仪的光瞳匹配,在光学设计软件中使用三反系统实现像方远心的条件式来进行实现控制。该条件式为

表 2 多重组态设计参数

Table 2 Design parameters of multiple configurations

Design parameter	Configuration 1	Configuration 2	Configuration 3	Configuration 4
Off-axis field of view / (°)	-9.3	-9.3	-9.0	-8.7
FOV No.	1	1	2	3
Spectrum	VNIR	SWIR	LWIR	MWIR
Spectral range / μm	0.4-1.0	1.0-2.5	8.0-12.5	3.0-5.0

$$d_2 = -R_3/2. \quad (7)$$

由于前置望远系统中设置了三个离轴视场,故将主、三镜引入非球面以增加像差校正能力。在初步优化后,为进一步提高系统性能,取消 $d_1 = -d_2$ 的限制,采用操作数进一步控制出射光线与像面的夹角以提高光学系统的远心度,并限制系统畸变。

最后,在 FOV 1、FOV 3 像面前 3 mm 和 2 mm 处插入两个折转反射镜(Mirror 1、Mirror 2)实现三视场

分离,通过精确控制反射镜插入光束的位置和方向,使反射镜边缘既不遮挡离轴视场 2 的出射光束,又能使三个视场的光束相互分开。控制反射镜的转动方向可以调节 FOV 1 和 FOV 3 光束的空间位置,为后续各谱段光谱仪的对接留下布局空间。最终得到焦距为 400 mm、全视场角为 2.864° 、 F 数为 2.6 和最大畸变为 0.25% 的三视场分离的像方远心离轴三反望远系统。三视场分离的光学系统光路如图 3 所示。

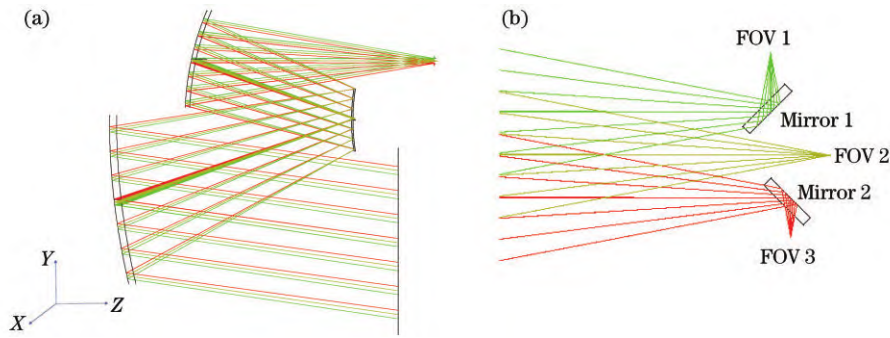


图 3 前置望远系统光路图。(a)整体光路;(b)像面处光路

Fig. 3 Optical path diagram of front telescopic system. (a) Overall optical path; (b) optical path at image plane

图 4 为离轴三反望远系统各谱段的调制传递函

数(MTF)曲线。由图可知:可见/近红外、短波红外

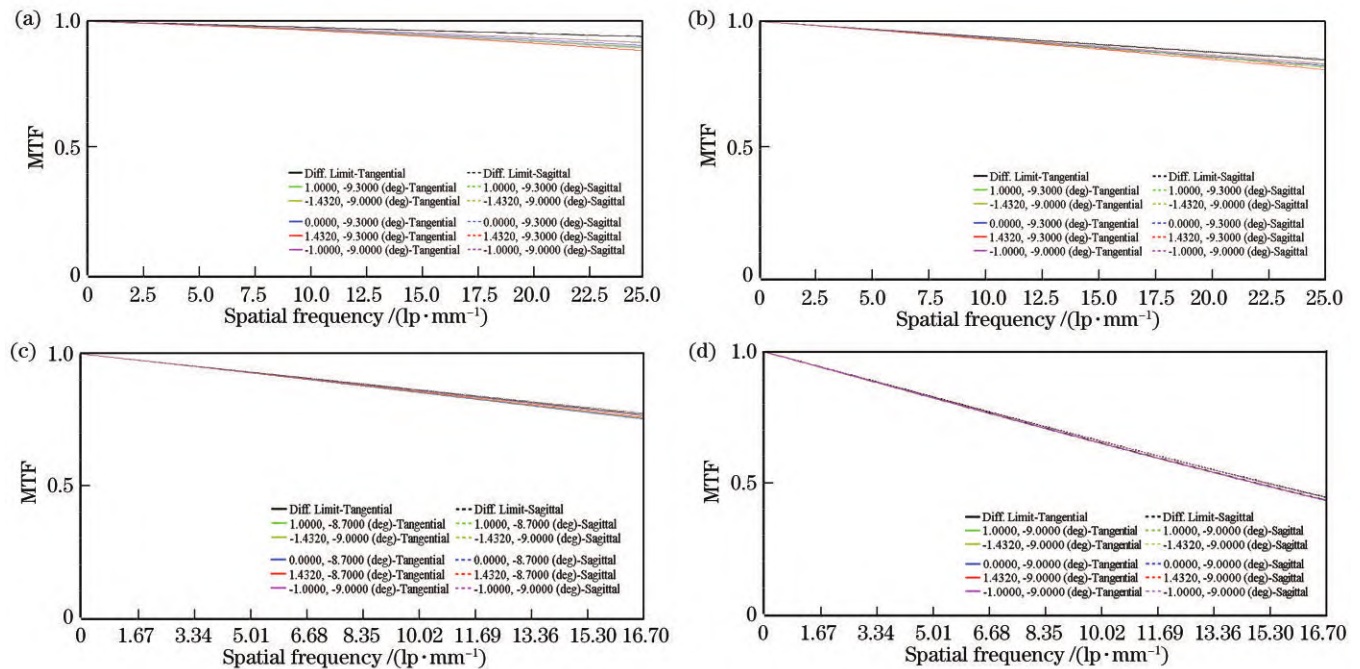


图 4 各谱段 MTF 曲线。(a) VNIR 谱段;(b) SWIR 谱段;(c) MWIR 谱段;(d) LWIR 谱段

Fig. 4 MTF curves of each spectral segment. (a) VNIR spectrum; (b) SWIR spectrum; (c) MWIR spectrum; (d) LWIR spectrum

谱段各视场在 Nyquist 频率为 25.0 lp/mm 处分别大于 0.88、0.81；中波红外、长波红外谱段各视场在 Nyquist 频率为 16.7 lp/mm 处分别大于 0.76、0.43。MTF 值均接近衍射极限，系统成像质量良好。

3.3 光谱仪设计

凸面光栅 Offner 光谱成像系统与反射式 Offner 中继系统具有相同的结构，只是将凸面光栅 Offner 光谱成像系统中第二块反射镜替换成了凸球面光栅，全系统仅由 3 块反射镜组成。凸面光栅 Offner 光谱成像系统的光路如图 5 所示。

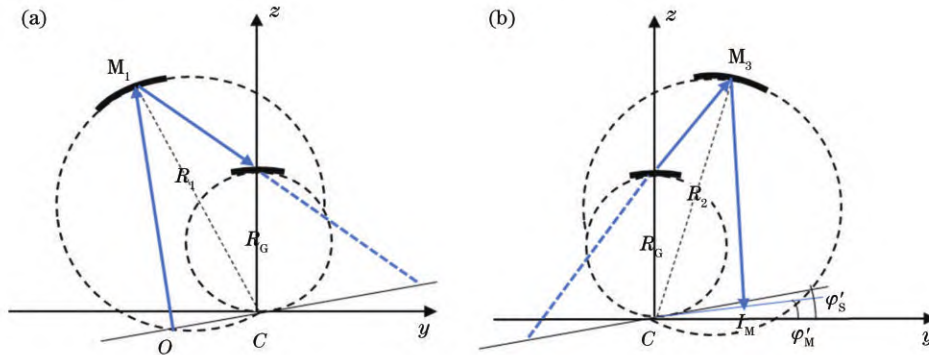


图 5 凸面光栅 Offner 光谱成像系统的光路图。(a) 入射光路；(b) 出射光路

Fig. 5 Optical path diagram of Offner spectral imaging system with convex grating. (a) Incident optical path; (b) outgoing optical path

表 3 各谱段 Offner 光谱仪初始结构参数

Table 3 Initial structural parameters of Offner spectrometer in each spectral band

Parameter	VNIR	SWIR	MWIR	LWIR
R_G /mm	66.67	66.67	60.00	50.00
Slit width / μm	20.00	20.00	33.30	49.18
Slit length /mm	20	20	20	20
Magnification	1.00	1.00	0.90	0.61
Spectral broadening /mm	2.40	3.00	1.20	1.35

对于放大率为 1.00 的可见/近红外、短波红外光谱仪，将各镜面曲率半径和各镜面距离作为优化变量，适当增加离轴量，使镜面之间不存在渐晕，优化完成后即可获得较好的成像质量。对于放大率不为 1.00 的 Offner 光谱成像系统，先求出放大率为 1.00 时的初始结构参数，在放大率为 1.00 时的优化过程基础上，逐步控制狭缝到主镜的距离和三镜到像面的距离，并将狭缝像通过操作数逐步由 1.00 放大率减小到所需放大率。

相对于其他三个谱段，长波红外谱段光谱仪的放大率为 0.61，随着 F 数的减小，在优化设计时，为消除渐晕需要逐步增大狭缝在 y 方向的离轴量。Offner 光谱仪狭缝位置任意一点 $O(x, y)$ 的像散 (a) 的表达式^[16]为

$$a = CI_M \tan(\varphi'_s - \varphi'_M), \quad (10)$$

$$k = \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{R_G}, \quad k_1 = \frac{R_1}{R_G}, \quad (11)$$

凸面光栅曲率半径 R_G 和反射镜曲率半径 R_1 、 R_2 的求解公式^[15]为

$$R_G = \frac{h_{\text{spec}}}{mN\Delta\lambda}, \quad (8)$$

$$R_1 = R_2 = 2R_G, \quad (9)$$

式中： h_{spec} 为光谱维长度； $\Delta\lambda$ 为光谱范围； $m=1$ 为分光级次； N 为光栅刻划密度。

为满足各谱段与前置望远系统光瞳匹配，将各光谱仪的数值孔径 NA 设为 0.192。计算得到的各谱段 Offner 光谱仪初始结构参数如表 3 所示。

$$CI_M = kR_2 \frac{\sin \gamma}{\sin \gamma'}, \quad (12)$$

$$\varphi'_s = \arctan \left[\frac{\sin \gamma'}{\sin \gamma} \cdot \tan \left(\arcsin k - 2 \arcsin \frac{k}{k_1} \right) \right], \quad (13)$$

$$\varphi'_M = 2 \arcsin \left(\frac{k}{k_1} \cdot \frac{\sin \gamma'}{\sin \gamma} \right) - \arcsin \left(k \cdot \frac{\sin \gamma}{\sin \gamma'} \right), \quad (14)$$

式中： φ'_s 和 φ'_M 分别为子午和弧矢像极角； γ 为主光线入射光栅的方位角； γ' 为衍射方位角； C 为主镜 M_1 、凸面衍射光栅和三镜 M_3 的公共球心； I_M 为 M_3 的子午像点。由式(10)~(14)可知，Offner 光谱仪的像散随着狭缝离轴量 y 的增加而增大。

当 F 数小于 2 时，Offner 结构消像散能力减弱，此时光谱仪不能完善成像。为使光谱仪完善成像，将非球面引入主镜和三镜中以增加设计自由度并消除像散影响，同时适当加入倾斜和偏心，最终得到 F 数为 1.5 的长波红外光谱仪，其主镜和三镜为八次非球面。

设计完成后的各谱段凸面光栅 Offner 光谱仪光路如图 6 所示。表 4 为各谱段光谱仪在 Nyquist 频率处不

同波长的 MTF,各谱段 MTF 分别大于 0.70、0.65、0.71、0.55。同时,由各谱段点列图可知,不同波长不

同视场的弥散斑的均方根(RMS)均小于一个探测器像元尺寸,满足成像质量要求。

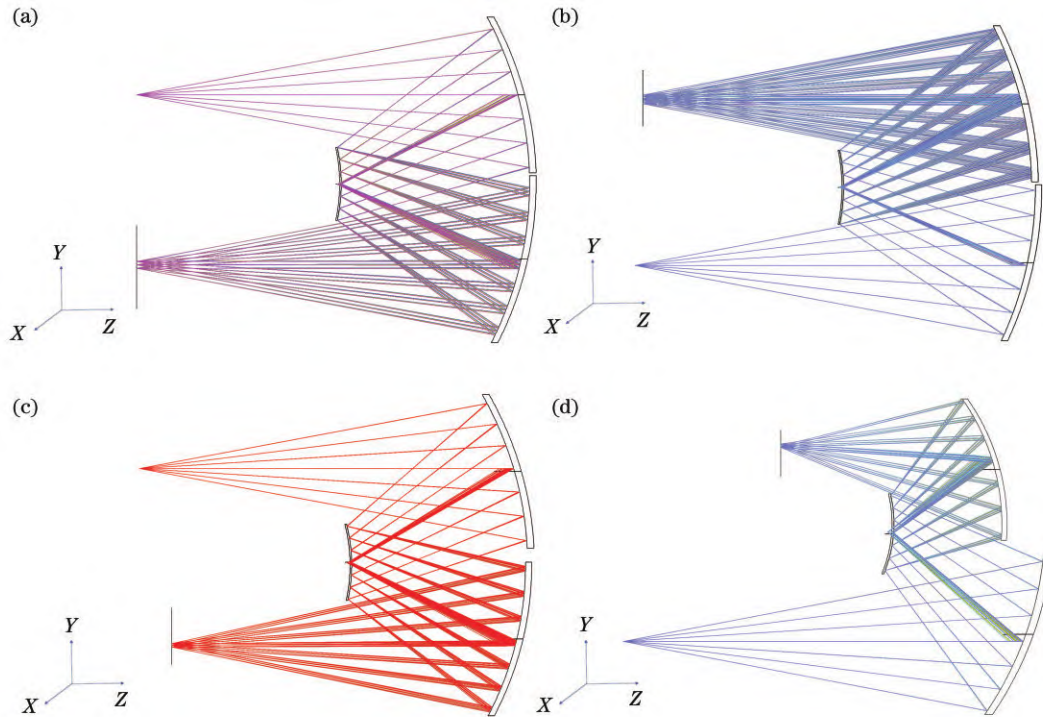


图 6 各谱段 Offner 光谱仪光路图。(a) VNIR;(b) SWIR;(c) MWIR;(d) LWIR

Fig. 6 Optical path diagram of Offner spectrometer in each spectral band. (a) VNIR; (b) SWIR; (c) MWIR; (d) LWIR

表 4 各谱段光谱仪在 Nyquist 频率处不同波长的 MTF
Table 4 MTF of different wavelengths at Nyquist frequency for each spectral band spectrometer

Spectrum	Wavelength / μm	MTF
VNIR	0.4	0.84
	0.7	0.74
	1.0	0.70
SWIR	1.0	0.65
	1.7	0.70
	2.5	0.65
MWIR	3.0	0.80
	4.0	0.77
	5.0	0.71
LWIR	8.0	0.66
	10.2	0.60
	12.5	0.55

3.4 全谱段高光谱成像仪全系统设计

将前置像方远心离轴三反望远系统与各谱段光谱仪衔接组合,在各离轴视场像面位置设置狭缝,可见/近红外谱段与短波红外谱段光谱仪共用狭缝,出射光束经分色片分光后进入各自谱段光谱仪光路中。视场分离折转反射镜旋转角度根据空间布局进行优化。在完成全系统拼接后,固定前置望远系统各反射镜间距

和曲率半径,将各光谱仪曲率半径、各表面间距作为优化变量,同时控制各谱段焦距、 F 数,使各光谱仪满足设计指标。优化完成后的全谱段高光谱成像仪全系统的光学结构如图 7 所示,整体尺寸为 $445\text{ mm} \times 435\text{ mm} \times 210\text{ mm}$ 。

图 8 为全系统各谱段中心波长处的 MTF 曲线。同时,可见/近红外、短波红外、中波红外和长波红外谱段各波长的 MTF 均大于 0.75、0.70、0.65、0.54,均接近衍射极限。图 9 为各谱段点扩散函数的截面图,图 9(a)~(d)中的波长间隔分别为 5、10、50、100 nm。可以发现,各谱段均达到光谱分辨率要求。由各谱段点列图可知,此时弥散斑 RMS 均小于一个探测器像元尺寸,通过获取各个谱段不同波长在全视场范围内的像面位置分布并计算分析,各谱段谱线弯曲和色畸变均小于各探测器像元尺寸的 1/10。设计结果表明,全系统各谱段成像质量良好,各项指标均达到设计要求。由于所提系统采用凸面光栅对各谱段进行分光,故可以在探测器或探测器窗口镀上截止滤光膜或用截止滤光片作为探测器的窗口来进行杂光处理,进而可有效地滤除其他波段光谱对系统成像带来的影响^[17]。Offner 结构自身较难实现冷光阑匹配,但是可以根据实际探测器参数,在中波和长波红外像面处对接一相应的二次成像中继系统来实现冷光阑匹配。虽然该操作增加了一定的复杂性,但是较容易实现。

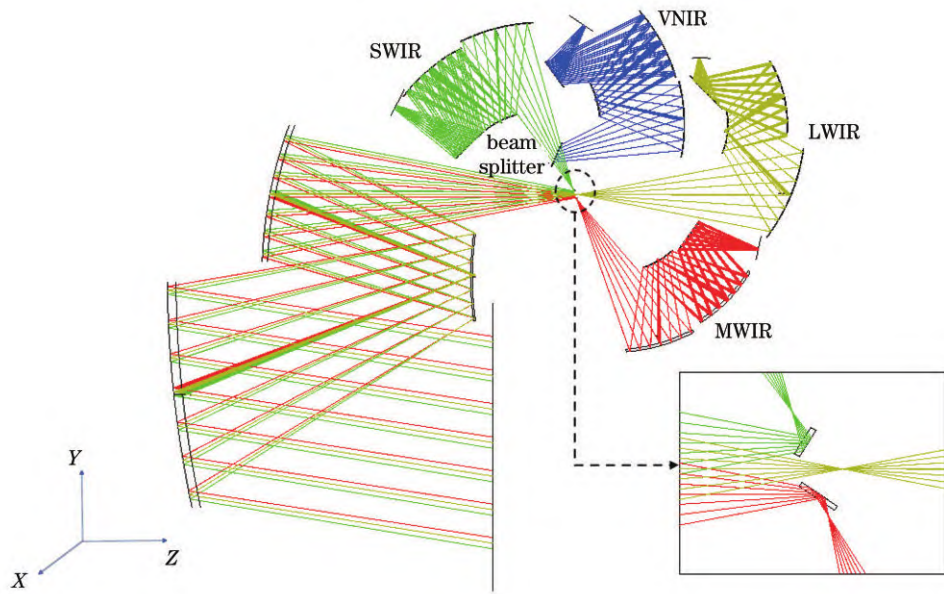


图 7 全系统光学结构图

Fig. 7 Optical structure diagram of whole system

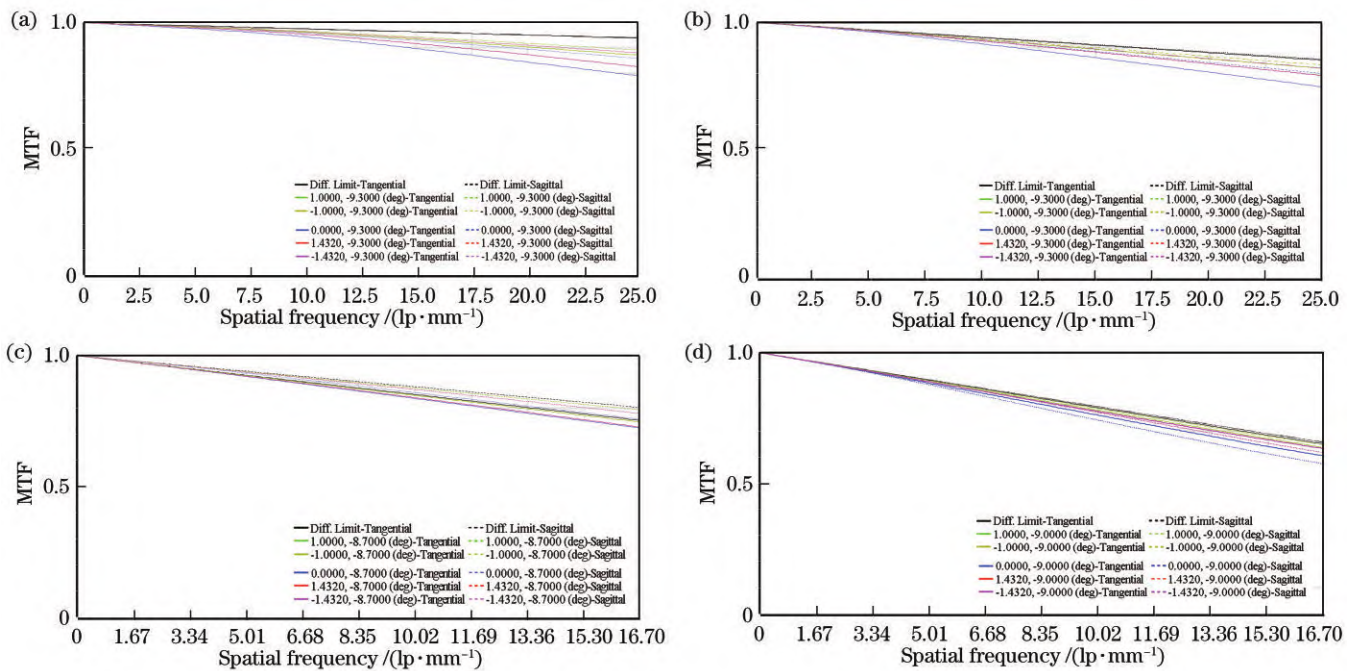


图 8 全系统各谱段中心波长处 MTF 曲线图。(a) 0.7 μm ; (b) 1.7 μm ; (c) 4.0 μm ; (d) 10.2 μm

Fig. 8 MTF curve of center wavelength of each spectral band in whole system. (a) 0.7 μm ; (b) 1.7 μm ; (c) 4.0 μm ; (d) 10.2 μm

4 结 论

就全谱段高光谱的应用和一体化需求,设计了共口径全谱段高光谱成像仪。针对前置望远系统四谱段高质量划分这一难点,采用视场分离分光与分色片分光相结合的谱段分离方法,设置了三个离轴视场,可见/近红外与短波红外谱段通过分色片进行谱段分离,中长波红外则利用视场分离分谱段,避免了中长波红外谱段的能量损失,实现了各谱段的高质量成像。针对后置光谱成像系统各谱段需要实现不同焦距这一问

题,通过设计放大率为 1.00 的可见/近红外、短波红外光谱仪,以及放大率分别为 0.90 和 0.61 的中长波红外光谱仪,不仅使各谱段达到设计幅宽和像元分辨率的要求,还有效减小了中、长波红外谱段光学系统的 F 数,使其分别达到 2.3 和 1.5。各谱段相对现有的设备,系统具有更大的相对口径,有利于信噪比的提高。所设计的全谱段高光谱成像仪与现有近地轨道高光谱系统相比,实现了全谱段高光谱成像。设计分析表明,该全谱段高光谱成像仪各波段成像质量良好,MTF 分别大于 0.75、0.70、0.65、0.54,均接近衍射极限,适合

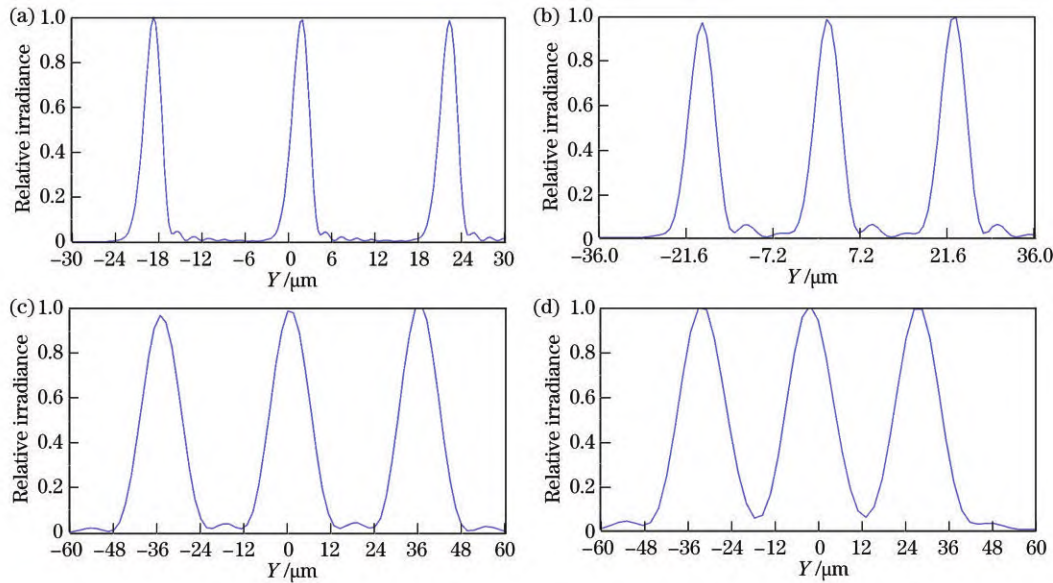


图9 各谱段点扩散函数截面图。(a) VNIR; (b) SWIR; (c) MWIR; (d) LWIR

Fig. 9 Cross-sectional view of point spread function of each spectral band. (a) VNIR; (b) SWIR; (c) MWIR; (d) LWIR

空间遥感应用。

参 考 文 献

- [1] 刘银年. 高光谱成像遥感载荷技术的现状与发展[J]. 遥感学报, 2021, 25(1): 439-459.
Liu Y N. Development of hyperspectral imaging remote sensing technology[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2021, 25(1): 439-459.
- [2] Peyghambari S, Zhang Y. Hyperspectral remote sensing in lithological mapping, mineral exploration, and environmental geology: an updated review[J]. Journal of Applied Remote Sensing, 2021, 15(3): 031501.
- [3] Tani 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, July 22-27, 2012, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2012: 131-134.
- [4] Labate D, Ceccherini M, Cisbani A, et al. The PRISMA payload optomechanical design, a high performance instrument for a new hyperspectral mission [J]. Acta Astronautica, 2009, 65(9/10): 1429-1436.
- [5] Mücke M, Sang B, Heider B, et al. EnMAP: Hyperspectral Imager (HSI) for Earth observation: current status[J]. Proceedings of SPIE, 2019, 11180: 2228-2237.
- [6] 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: 2583-2596.
- [7] Lee C M, Cable M L, Hook S J, et al. An introduction to the NASA Hyperspectral InfraRed Imager (HypIRI) mission and preparatory activities[J]. Remote Sensing of Environment, 2015, 167: 6-19.
- [8] 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, 2020, 24(4): 333-344.
- [9] 刘银年, 张宗存, 张民山, 等. 共口径多通道全波段高光谱成像系统: CN208688660U[P]. 2019-04-02.
Liu Y N, Zhang Z C, Zhang M S, et al. Be total to bore multichannel all band hyperspectral imager system: CN208688660U[P]. 2019-04-02.
- [10] 王建宇, 李春来. 高光谱遥感成像技术的发展与展望[J]. 空间科学学报, 2021, 41(1): 22-33.
Wang J Y, Li C L. Development and prospect of hyperspectral imager and its application[J]. Chinese Journal of Space Science, 2021, 41(1): 22-33.
- [11] 沈宇航, 倪争技, 黄元申, 等. 凸面光栅同心结构成像光谱仪的研究进展[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(9): 0900002.
Shen Y H, Ni Z J, Huang Y S, et al. Research progress of concentric imaging spectrometer with convex grating [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2021, 58(9): 0900002.
- [12] 郑玉权, 王慧, 王一凡. 星载高光谱成像仪光学系统的选择与设计[J]. 光学精密工程, 2009, 17(11): 2629-2637.
Zheng Y Q, Wang H, Wang Y F. Selection and design of optical systems for spaceborne hyperspectral imagers [J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(11): 2629-2637.
- [13] 李瑞昌, 邹刚毅, 王臣臣, 等. 可见光与红外一体化光学系统设计[J]. 光学学报, 2016, 36(5): 0522002.
Li R C, Zou G Y, Wang C C, et al. Optical design of visible and infrared integrative camera[J]. Acta Optica Sinica, 2016, 36(5): 0522002.
- [14] 刘晓梅, 向阳. 宽视场成像光谱仪前置远心离轴三反光学系统设计[J]. 光学学报, 2011, 31(6): 0622004.

- Liu X M, Xiang Y. Design of telecentric off-axis three-mirror system of imaging spectrometer with wide field-of-view[J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(6): 0622004.
- [15] 吴从均, 颜昌翔, 刘伟, 等. 基于 Offner 结构分视场成像光谱仪光学设计[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(8): 2272-2276.
- Wu C J, Yan C X, Liu W, et al. Sub-field imaging spectrometer design based on Offner structure[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(8): 2272-2276.
- [16] 朱嘉诚, 沈为民. 紧凑型消像散长狭缝光谱仪光学系统[J]. 红外与毫米波学报, 2019, 38(4): 542-548.
- Zhu J C, Shen W M. Compact anastigmatic long-slit spectrometer[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2019, 38(4): 542-548.
- [17] 高柳絮. 中波红外光谱成像系统设计与分析[D]. 长春: 长春理工大学, 2019: 47-48.
- Gao L X. The design and analysis of medium wave infrared spectral imaging system[D]. Changchun: Changchun University of Science and Technology, 2019: 47-48.