

文章编号 2097-1842(2024)03-0661-13

痕量气体掩星探测高光谱成像光谱仪光学系统设计

孔相金^{1,2}, 李 博^{1*}, 李寒霜¹, 王晓旭¹, 顾国超¹, 蒋 雪¹
(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033;
2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:痕量气体作为大气的重要成份,对地球的生态起着重要作用。为了实现宽波段、高光谱全天时连续测量,本文设计了一款在掩星探测模式下工作的高光谱成像光谱仪。该系统为共狭缝的双通道结构,紫外-可见光通道采用单凹面光栅结构、红外通道采用利特罗与浸没光栅结合结构,有效地减小了体积。利用软件对光学结构进行优化,优化结果表明:光谱仪在 250~952 nm 波段范围内工作,其中紫外-可见光通道工作波段为 250~675 nm、光谱分辨率优于 1 nm、MTF 在奈奎斯特频率为 20 lp/mm 处均高于 0.58、全视场各波长处 RMS 值均小于 21 μm ;红外通道工作波段为 756~952 nm、光谱分辨率优于 0.2 nm、MTF 在奈奎斯特频率为 20 lp/mm 处均高于 0.76、全视场各波长处 RMS 值均小于 6 μm ,均满足设计要求。结果表明该高光谱成像光谱仪系统可以实现对痕量气体的掩星探测。

关键词:光学系统设计;掩星探测;痕量气体;高光谱成像光谱仪

中图分类号:TP394.1; TH691.9

文献标志码:A

doi: 10.37188/CO.2023-0153

Optical system design of hyperspectral imaging spectrometer for trace gas occultation detection

KONG Xiang-jin^{1,2}, LI Bo^{1*}, LI Han-shuang¹, WANG Xiao-xu¹, GU Guo-chao¹, JIANG Xue¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,

Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

* Corresponding author, E-mail: libo0008429@163.com

Abstract: Trace gases, as important constituents of the atmosphere, play an important role in the ecology of the planet. In order to realize the requirements of wide-band, hyperspectral and all-weather continuous measurement, a hyperspectral imaging spectrometer operating in occultation detection mode is designed in this paper. The system is a dual-channel structure with a common slit, the UV-visible channel adopts a single concave grating, and the infrared channel adopts a structure combining Littrow and immersion grating, which effectively reduces the volume. The software is used to optimize the optical structure, and the optimization results show that the spectrometer operates in the range of 250–952 nm wavelengths, of which the UV-visible

收稿日期:2023-08-30; 修订日期:2023-09-22

基金项目:国家重点研发计划(No.2022YFB3903202); 国家自然科学基金(No.62205330)

Supported by National Key Research and Development Program of China (No.2022YFB3903202); National Natural Science Foundation of China (No. 62205330)

channel operates in the wavelength range of 250–675 nm, the spectral resolution is better than 1 nm, the MTFs are all higher than 0.58 at a Nyquist frequency of 20 lp/mm, and the RMS values at various wavelengths of the full-field-of-view are all less than 21 μm ; the infrared channel operates in the wavelength band of 756–952 nm, the spectral resolution is better than 0.2 nm, the MTF is higher than 0.76 at the Nyquist frequency of 20 lp/mm, and the RMS value at each wavelength in the whole field of view is less than 6 μm , all of them meet the design requirements. It can be seen that the hyperspectral imaging spectrometer system can realize the occultation detection of trace gases.

Key words: optical system design; occultation detection; trace gas; hyperspectral imaging spectrometer

1 引言

人类活动对地球生态系统的影响正在逐渐增加,导致大气各成分的含量随之变化,这种变化会越来越明显,甚至可能带来危险^[1]。如大气中的 SO_2 等酸性气体含量的增加使酸雨出现的更加频繁,对地表生命造成危害;臭氧等温室气体含量的增加会使全球气温升高,海平面升高^[2-3]。因此,对大气中痕量气体的探测有着重要意义。

成像光谱技术是目前应用非常广泛的技术,其在地物分析、空间遥感、目标侦察等方面有着广泛的应用前景,可以同时获得光谱和空间两个维度的信息^[4-6]。国内外已有多颗卫星通过成像光谱仪对大气痕量气体含量及分布进行探测。隶属于欧空局的SCIAMACHY^[7]载荷在240~2400 nm波段范围内光谱分辨率为0.5 nm,主要工作模式为天底探测、临边探测及掩星探测,主要目标为获取平流层臭氧含量数据,附带获得部分痕量气体数据;美国的臭氧成像探测仪OMPS^[8]在250~420 nm波段内的光谱分辨率为1~1.1 nm,其采用天底探测和临边探测结合的探测方式,用于收集紫外光谱数据,反演大气层臭氧等痕量气体的垂直和水平分布情况。此外,还有工作模式只是掩星模式的载荷,例如加拿大航天局SCISAT卫星上搭载的载荷ACE-FTS^[9]在750~4440 cm^{-1} 波段范围内的光谱分辨率为0.02 cm^{-1} ,用于气溶胶、温度和大气痕量气体的研究;美国国家航空航天局发射的Aura地球观测系统卫星上搭载的臭氧监测仪OMI^[10]工作在270~500 nm波段,光谱分辨率可达0.45~1 nm,主要用于监测大气中的臭氧柱浓度和廓线、气溶胶,还有其它的痕量气体。

搭载在FY-3^[10-11]卫星上的紫外臭氧总量探测仪TOU,由中国科学院国家空间科学中心研制,是我国首个自主研制的全球臭氧总量监测仪器,工作波段为308~360 nm,光谱分辨率为1 nm,主要科学目标是探测全球臭氧的总体分布,为气候和环境监测提供可靠的臭氧分布参数;我国自主研发的GF-5^[12]号卫星上搭载的大气环境红外甚高分辨率探测仪AIUS工作波段为2400~13300 nm,采用掩星探测模式,光谱分辨率为0.02 cm^{-1} ,主要目标是将全球痕量气体分布量化。

目前国内痕量气体探测所用的成像光谱仪多为天底、临边探测模式,对于掩星探测模式的光谱仪研究较少。天底和临边探测模式对太阳光照有着很强的依赖性,需要在较为明亮的区域进行观测,对于阴影区域太阳的入射光强较弱,载荷所接收的反射信号较弱,阴影区观测难,因此无法实现全天时观测。

为解决上述问题,本文设计了一款双通道高光谱成像光谱仪。其工作模式为掩星探测,可将天狼星等较亮的恒星作为自然光源,采用大口径望远镜充分收集恒星光照,保证微弱光信号的充分接收。优化结果表明所设计成像光谱仪满足设计要求。结合其他日照区工作载荷,可实现对痕量气体的全天时测量。

2 成像系统技术指标

目前大多数光谱仪采用一个通道,对多波段探测则需要多个光谱仪^[13]。该双通道成像光谱仪的工作波段为250~952 nm,其中,紫外-可见光通道的工作波段为250~675 nm,光谱分辨率优于1 nm,主要对大气中平流层的臭氧、 NO_2 、 SO_2 等痕量气体浓度的垂直分布廓线进行探测。由于痕

量气体臭氧的一个吸收波段 310~350 nm(哈金斯波段)的测量结果对大气温度有很强的依赖性, 故可以通过对臭氧的探测实现对大气温度的探测。大气中的微量气体水蒸气及其衍生物是臭氧层破坏的主要因素, 会对臭氧的探测精度有重要影响, 也需对氧气和水蒸气含量进行测量。

该成像光谱仪的红外通道光谱范围为 756~952 nm, 光谱分辨率优于 0.2 nm, 主要对大气中的氧气(特征谱段 756~773 nm)、水蒸气及其衍生物(特征波段 926~952 nm)进行探测。对于掩星探测来说, 以上光谱分辨率可以达到探测需求。

该成像系统采用的探测器为英国 E2V 公司生产的电子倍增型 CCD, 不仅解决了弱波段信号的成像问题, 还具有较大的动态范围和极高的探测灵敏度^[14]。该探测器像元数为 1024×1024, 像元尺寸为 13 μm×13 μm, 双通道空间维和光谱维均采用 2 个像元合并, 其探测原理图如图 1 所示。

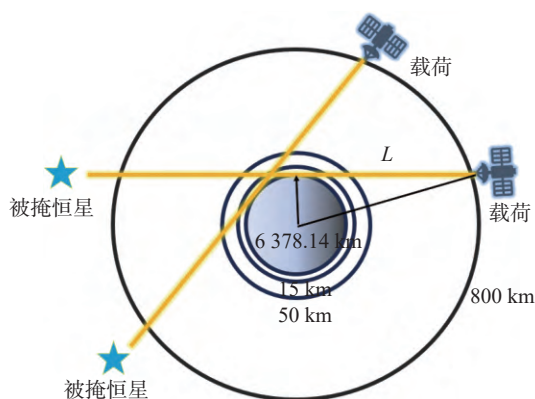


图 1 掩星探测原理图

Fig. 1 Schematic diagram of occultation detection

该光谱仪计划轨道高度 H 为 800 km, 它的掩星探测距离 L 为

$$L = \sqrt{(R+H)^2 - R^2}, \quad (1)$$

其中 R 为地球半径, 值为 6378.14 km, 由此可得探测距离 L 为 3293.18 km。令 G_{sd} 为像元分辨率, a 为等效像元尺寸, f 为系统焦距, 则由 $\frac{G_{sd}}{L} = \frac{a}{f}$ 可得:

$$G_{sd} = \frac{La}{f}, \quad (2)$$

其中 $a=26 \mu\text{m}$, $f=950 \text{ mm}$, 可得 $G_{sd}=90.13 \text{ m}$, 因此

垂直分辨率为 180.26 m。该成像光谱仪的主要技术指标要求如表 1 所示。

表 1 成像光谱仪的主要技术指标

Tab. 1 Main technical indicators of imaging spectrometer

参数	指标
系统波段/nm	250~952
视场/(°)	0.48
焦距/mm	950
F数	8.26
光谱分辨率/nm	0.2~1
狭缝长度/mm	7.96
MTF	>0.58@20 lp/mm
探测器像元数/pixel	1024×1024
探测器像元尺寸/μm	13×13

3 成像系统理论分析

红外通道采用浸没光栅, 可以在保证光谱分辨率的情况下, 有效减小系统尺寸。浸没光栅是一种在内部发生衍射的光栅, 是衍射光栅与棱镜(浸没介质)的结合。光线经过入射表面进入棱镜内部, 在棱镜内部发生衍射后再通过入射表面折射出来。浸没光栅的角色散、光程差都与棱镜的折射率 n 成正比, 所以光谱的角色散和分辨率就提高了 n 倍^[15]。由于该元件的特性, 当光谱分辨率固定时, 采用浸没光栅可以有效的缩小仪器的体积与重量, 相反, 当仪器的体积固定时, 采用浸没光栅可以有效提高光谱分辨率^[16]。

红外通道的两个波段 756~773 nm、926~952 nm 使用同一块浸没光栅, 有

$$d(\sin\theta + \sin i) = m\lambda, \quad (3)$$

式中, d 为光栅间距, θ 为衍射角, i 为入射角, m 为衍射级次, λ 为波长。

为了减小系统的体积, 应使两波段衍射角度相近, 即

$$\sin\theta_1 + \sin i = \sin\theta_2 + \sin i, \quad (4)$$

其中, θ_1 为 756~773 nm 波段的中心波长 764.5 nm 的衍射角, θ_2 为 926~952 nm 波段的中心波长 939 nm

的衍射角。采用同一块光栅,光栅间距 d 相同,故

$$m_1 \lambda_1 = m_2 \lambda_2, \quad (5)$$

即

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{\lambda_2}{\lambda_1}. \quad (6)$$

为了避免级次重叠,选择最小的级次,756~773 nm 波段选择的级次 m_1 为 16 阶,926~952 nm 选择的级次 m_2 为 13 阶。将两波段的中心波长 λ_1 和 λ_2 数值代入,可得 $m_1/m_2 = 16/13$ 。

色散长度决定着光谱分辨率,是成像光谱仪的重要设计指标。

$$\Delta_l = \frac{\Delta_\lambda \times k \times \sigma}{\delta_\lambda}, \quad (7)$$

其中: Δ_l 为色散长度, Δ_λ 为波段长度, k 为采样因子, σ 为合并后的像元尺寸, δ_λ 为光谱分辨率。

为了满足红外通道光谱分辨率优于 0.2 nm 的要求,红外两个像面色散长度应分别达到 4.42 mm 和 6.76 mm。同理,为了满足紫外通道光谱分辨率优于 1 nm 的要求,紫外-可见光通道色散长度应达到 22.1 mm。

4 成像光学系统设计

4.1 望远系统设计

望远系统工作波段包含紫外波段,紫外光线经过透射光学元件后能量损失较大,所以望远系统应尽可能采用反射结构。本文中,其由两个反射镜以及两块透镜构成。两个反射镜采用非球面面型,有效矫正了像差以及畸变,透镜材料为熔融石英,熔融石英具有较好的光谱特性^[14]。为了实现光谱仪双通道的共狭缝设计,在主镜前添加一个表面并设为光阑,实现入瞳分离。优化时,控制系统焦距、入瞳直径以保证系统的 F 数稳定。控制各视场主光线在像面上的入射角度,便于与后续系统对接。

经过优化后,获得如图 2 所示的望远系统的二维图、三维图。

掩星探测方式信号相对较弱,需要大口径的望远系统对微弱信号进行收集,该望远系统主镜口径为 300 mm,可实现对微弱信号收集。经过优化后,望远系统的光学传递函数 MTF 曲线如

图 3(彩图见期刊电子版)所示,红外通道在奈奎斯特频率 20 lp/mm 处,MTF 值优于 0.8;紫外-可见光通道在奈奎斯特频率 20 lp/mm 处,MTF 值优于 0.9,双通道均接近衍射极限,成像质量高。望远系统点列图如图 4 所示,双通道在 5 个视场内 RMS 最大值为 2.58 μm ,小于合并像元后尺寸的一半,符合设计要求。

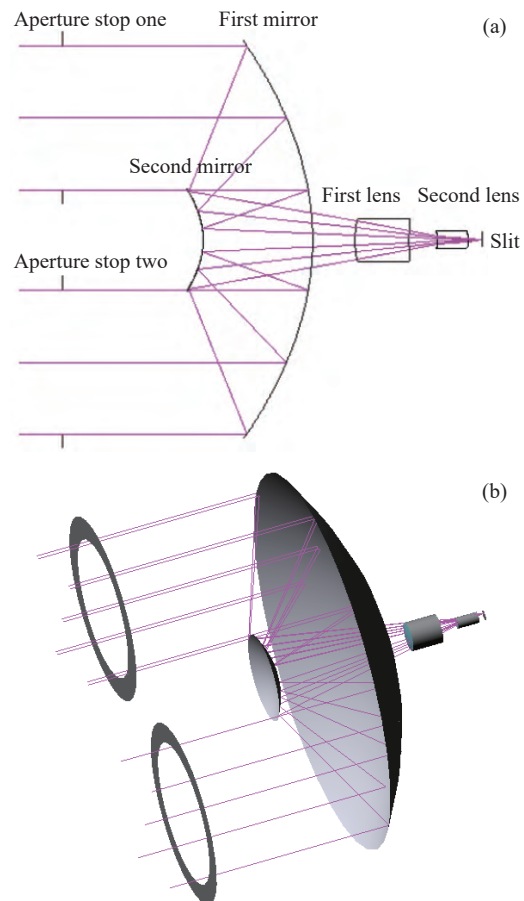
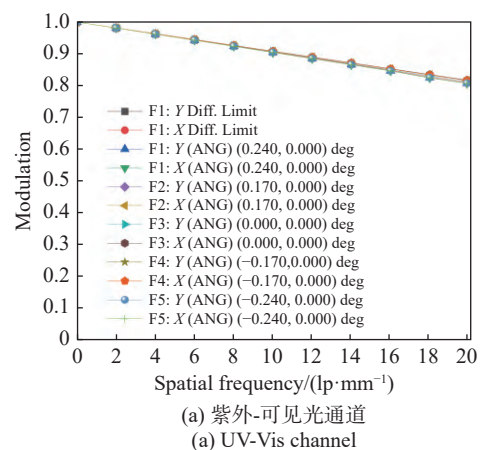
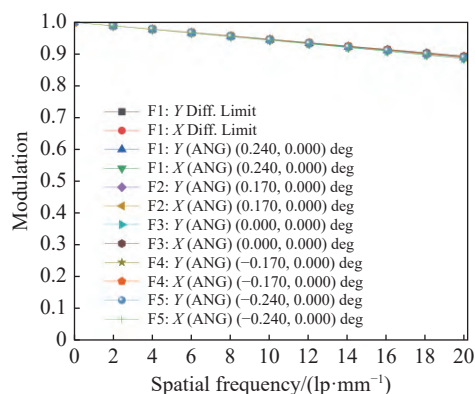


图 2 望远系统结构图。(a)二维图;(b)三维图

Fig. 2 Structure diagram of the telescopic system. (a) two-dimensional view; (b) three-dimensional view

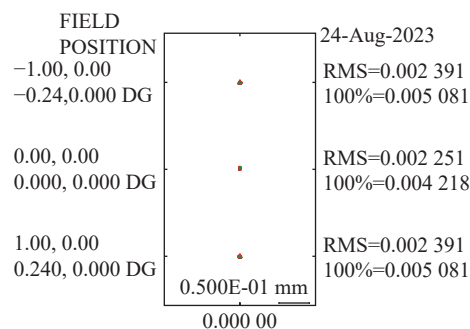




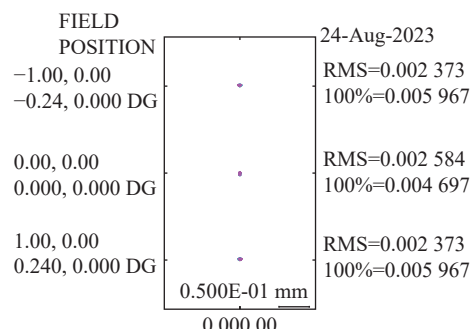
(b) 红外通道
(b) Infrared channel

图3 望远系统MTF曲线图

Fig. 3 MTF graph of the telescopic system



(a) 紫外-可见光通道
(a) UV-Vis channel



(b) 红外通道
(b) Infrared channel

图4 望远系统点列图

Fig. 4 Spot diagram of the telescopic system

4.2 紫外-可见光通道系统设计

紫外-可见光通道的工作波段包含紫外波段, 为避免能量损失, 通道只使用一个反射凹面光栅。该通道具有光谱位置稳定^[12]、结构简单、便于装调等优点。将狭缝长度设定为 7.96 mm、物方数值孔径设定为 0.05, 并将工作波长等参数输入后获得初始结构。将孔径光阑放置在凹面光栅上, 凹面光栅采用超环面面型, 以有效弥补像差。由于紫外信号较弱, 为避免可见光信号的干扰, 利

用分光板将紫外波段(250~379 nm)和可见光波段(380~675 nm)分别成像于像面 1 和像面 2。将凹面光栅的面型参数、光栅参数设为变量, 给其余表面添加偏心变量, 控制凹面光栅的光栅间距、焦距、色散长度等参数, 优化完成后获得如图 5 所示的成像系统二维图、三维图。

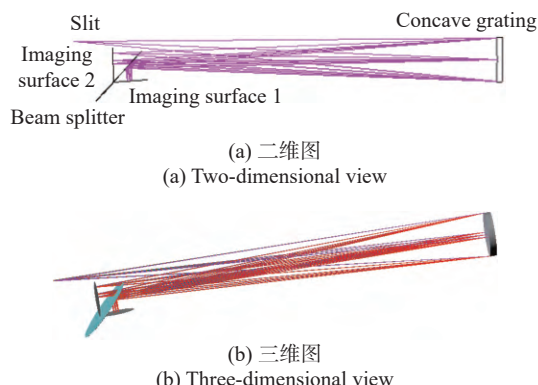
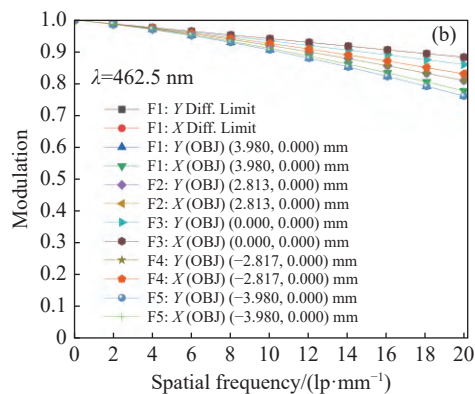
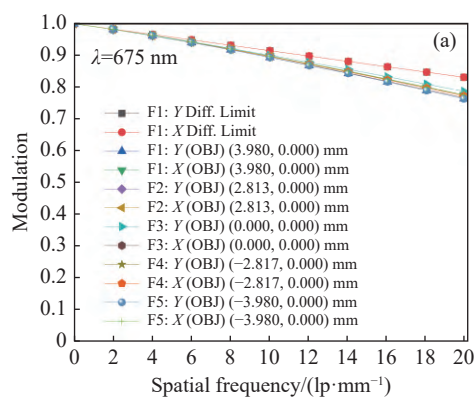


图5 紫外-可见光分光系统结构图

Fig. 5 Structural diagram of UV-Vis spectroscopic system

优化完成后, 像面 1 的色散长度已达到 8 mm, 像面 2 的色散长度已达到 17 mm, 经理论分析, 紫外-可见光通道的光谱分辨率优于 1 nm。全视场各波长 MTF 曲线在奈奎斯特频率 20 lp/mm 处均大于 0.65, 符合设计要求。在波长 675 nm、462.5 nm、250 nm 处的 MTF 曲线如图 6 所示。



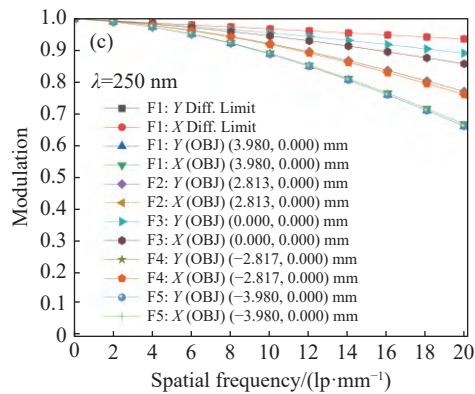
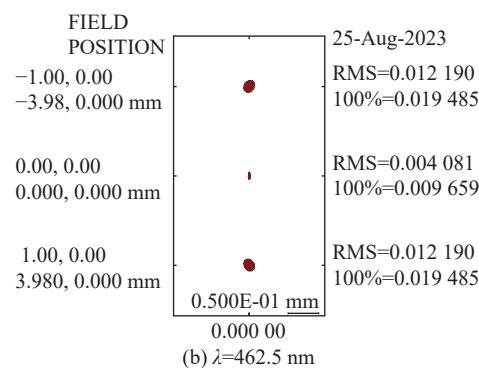
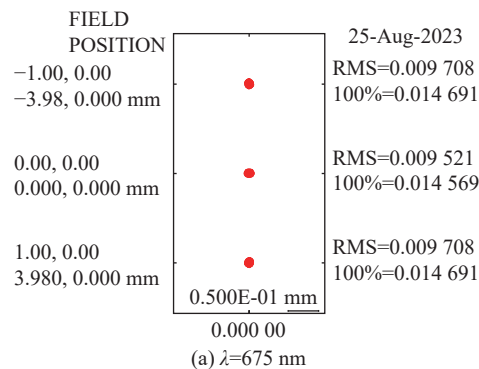


图 6 不同波长下紫外-可见光通道 MTF 曲线图。(a) $\lambda=675$ nm; (b) $\lambda=462.5$ nm; (c) $\lambda=250$ nm

Fig. 6 MTF graph of UV-vis channel at the wavelengths of (a) $\lambda=675$ nm; (b) $\lambda=462.5$ nm; (c) $\lambda=250$ nm

观察其点列图, 最大 RMS 值为 $18.4 \mu\text{m}$, 满足设计要求。各视场各波长点列图 RMS 数值如图 7 所示。



(a) 二维图
(a) Two-dimensional view



(b) 三维图
(b) Three-dimensional view

图 8 红外通道结构图

Fig. 8 Structural diagram of infrared channel

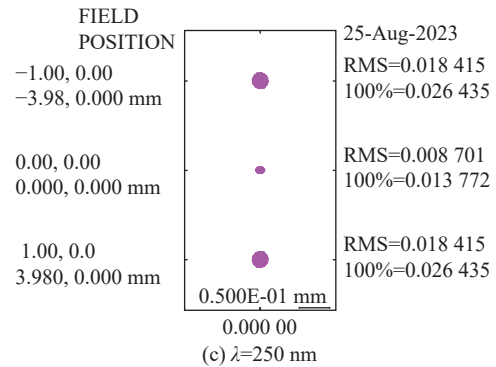


图 7 紫外-可见光通道点列图
Fig. 7 Spot diagram of UV-vis channel

4.3 红外通道系统设计

红外通道工作波段为 $756\sim 952$ nm。为了能与前置望远系统产生良好对接, 红外成像系统的物方数值孔径设定为 0.05、狭缝长度设定为 7.96 mm, 将上述参数输入系统, 获得初始结构。系统采用利特罗结构, 光栅采用浸没光栅, 有效减小了红外通道系统的整体尺寸。将孔径光阑设置在系统的光栅面上, 光栅间距为 0.031 , $756\sim 773$ nm 波段使用浸没光栅的 16 阶、 $926\sim 952$ nm 波段使用浸没光栅的 13 阶。为避免两波段在像面上发生混叠, 利用分光板使两波段分别成像于两个探测器上。

在优化过程中, 将每块透镜的表面曲率半径、厚度及材料设为变量, 再根据设计要求控制变量。为了满足光谱分辨率优于 0.2 nm 的要求, 需要控制像面 3 ($756\sim 773$ nm 波段像面) 的色散长度为 4.42 mm; 控制像面 4 ($926\sim 952$ nm 波段像面) 的色散长度为 6.76 mm。为了平衡像差以及色差, 选择不同材料透镜共 4 块, 分别为 SF4、NSK15、NK5、NFK5, 浸没光栅的材料选择 HZF6。

经过优化后, 获得红外通道系统二维图、三维图, 如图 8 所示。

优化完成后, 获得红外通道全视场各波长的MTF曲线。可见, 在奈奎斯特频率 20 lp/mm 处, 各波长均优于 0.75 且接近衍射极限, 成像质量

较好, 符合设计要求。在波长 952 nm、939 nm、926 nm、773 nm、764.5 nm、756 nm 处的 MTF 曲线如图 9(彩图见期刊电子版)所示。

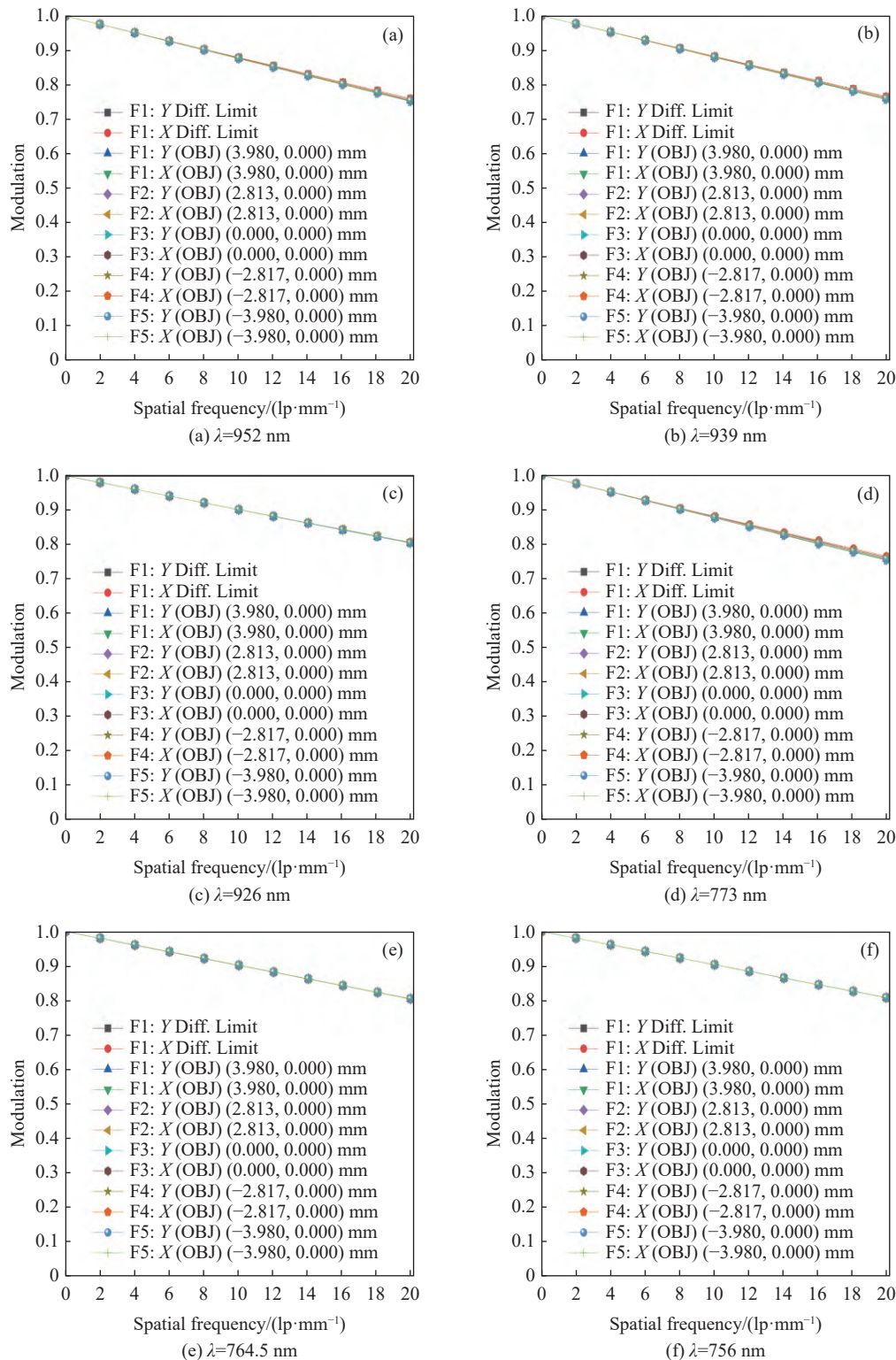


图9 红外通道不同波长下的MTF曲线图。(a) $\lambda=952$ nm; (b) $\lambda=939$ nm; (c) $\lambda=926$ nm; (d) $\lambda=773$ nm; (e) $\lambda=764.5$ nm; (f) $\lambda=756$ nm

Fig. 9 MTF graph of infrared channel at the wavelengths of (a) $\lambda=952$ nm; (b) $\lambda=939$ nm; (c) $\lambda=926$ nm; (d) $\lambda=773$ nm; (e) $\lambda=764.5$ nm; (f) $\lambda=756$ nm

由优化后获得的点列图可知,最大的 RMS 值为 $4.02\ \mu\text{m}$, 小于 2 个像元合并后像元尺寸的 $1/2$,

由此可判断成像质量较高,符合设计要求。各波长处点列图如图 10(彩图见期刊电子版)所示。

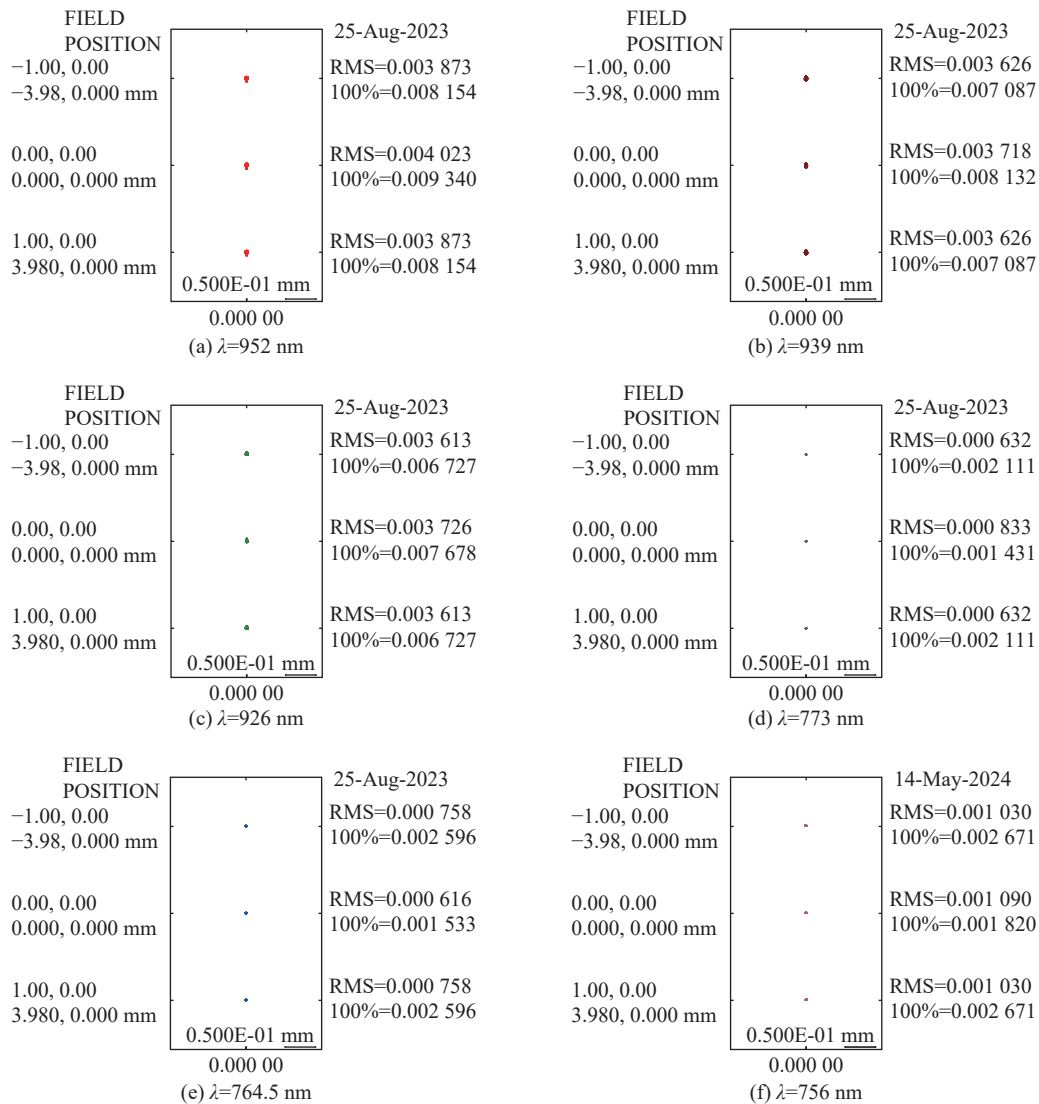


图 10 红外通道点列图

Fig. 10 RMS image of infrared channel ($\lambda=952$, 939, 926, 773, 764.5, 756 nm)

4.4 整体光学系统设计

将望远系统与紫外-可见光通道系统、红外通道系统对接,获得高光谱成像光谱仪结构如图 11 所示。系统 4 个像面距离前一光学元件均大于 9 mm,便于后续探测器的安装。

拼接后的光谱仪的紫外-可见光通道 MTF 曲线在 20 lp/mm 奈特奎频率下全视场各波长处均大于 0.58; 红外通道 MTF 曲线在 20 lp/mm 奈特奎频率下全视场各波长处均大于 0.76。成像效果较好,符合设计要求,各波长处 MTF 曲线如图 12(彩图见期刊电子版)所示。

拼接后的光谱仪紫外-可见光通道的 RMS 最大值为 $21\ \mu\text{m}$; 红外通道的 RMS 最大值为 $6\ \mu\text{m}$, 两通道均符合设计要求,成像质量良好。全视场各波长的点列图如图 13(彩图见期刊电子版)所示。

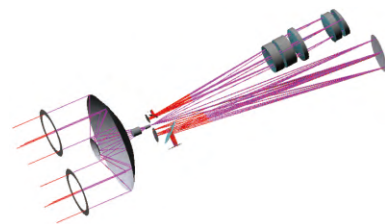
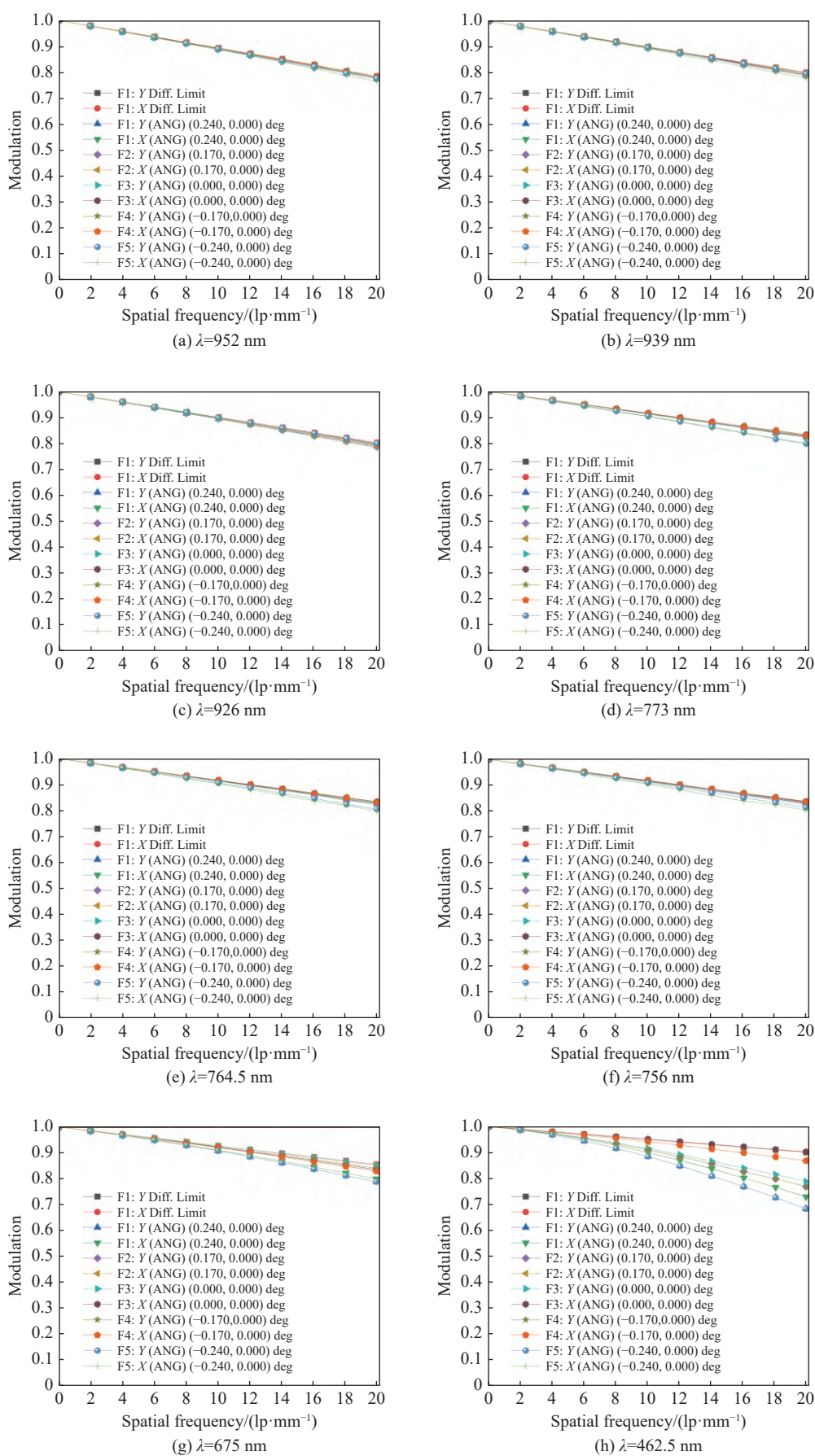


图 11 光谱仪整体结构图

Fig. 11 Overall structure diagram of the spectrometer



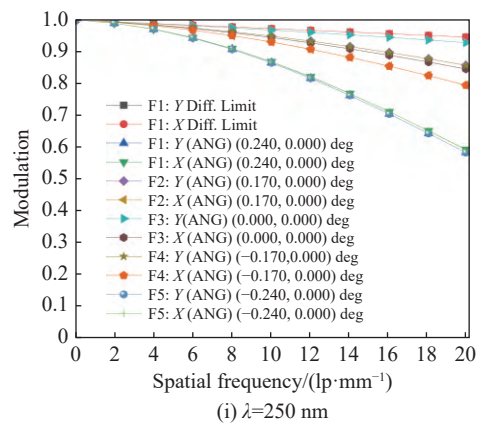
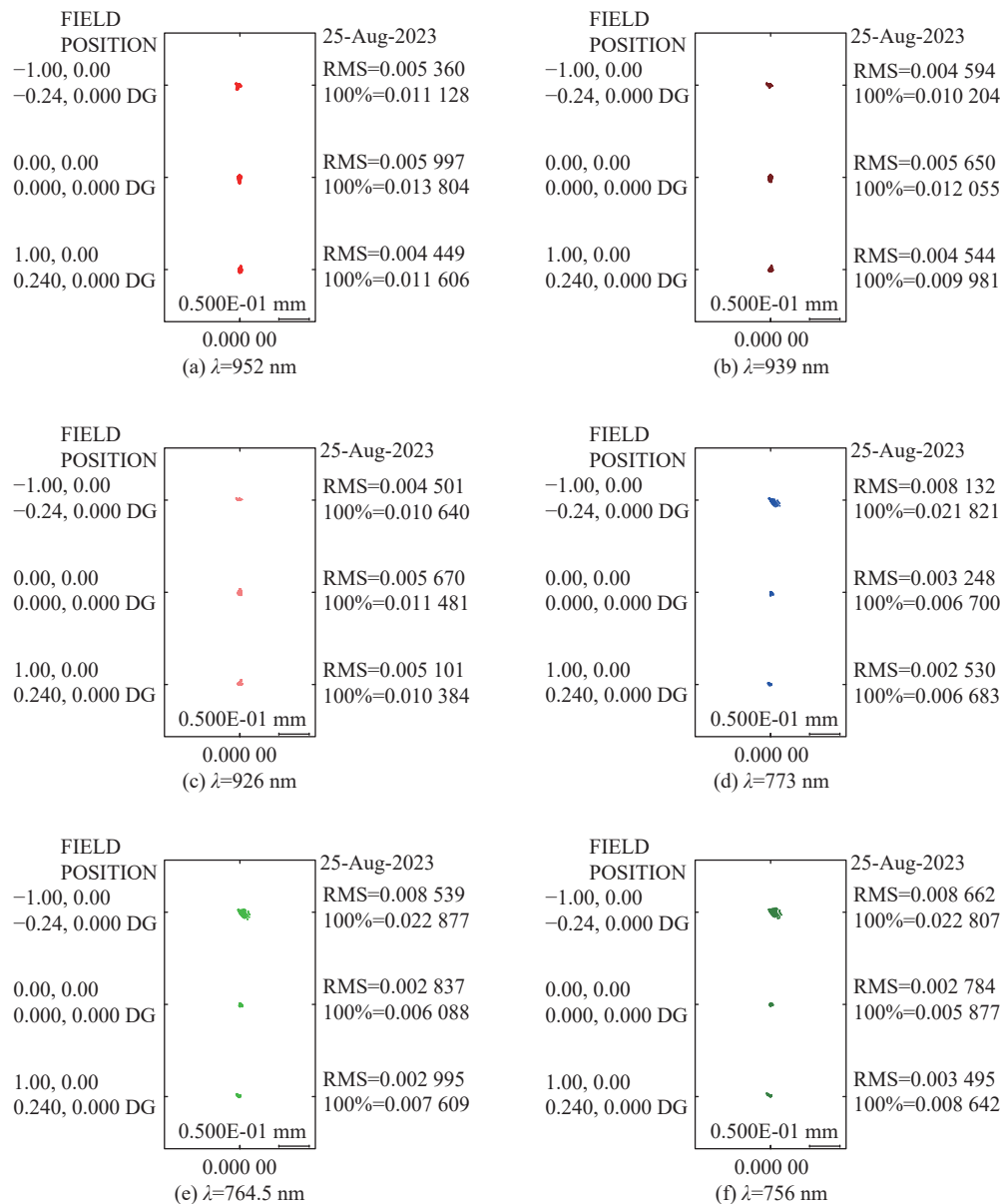


图 12 光谱仪 MTF 曲线图

Fig. 12 MTF graph of the spectrometer



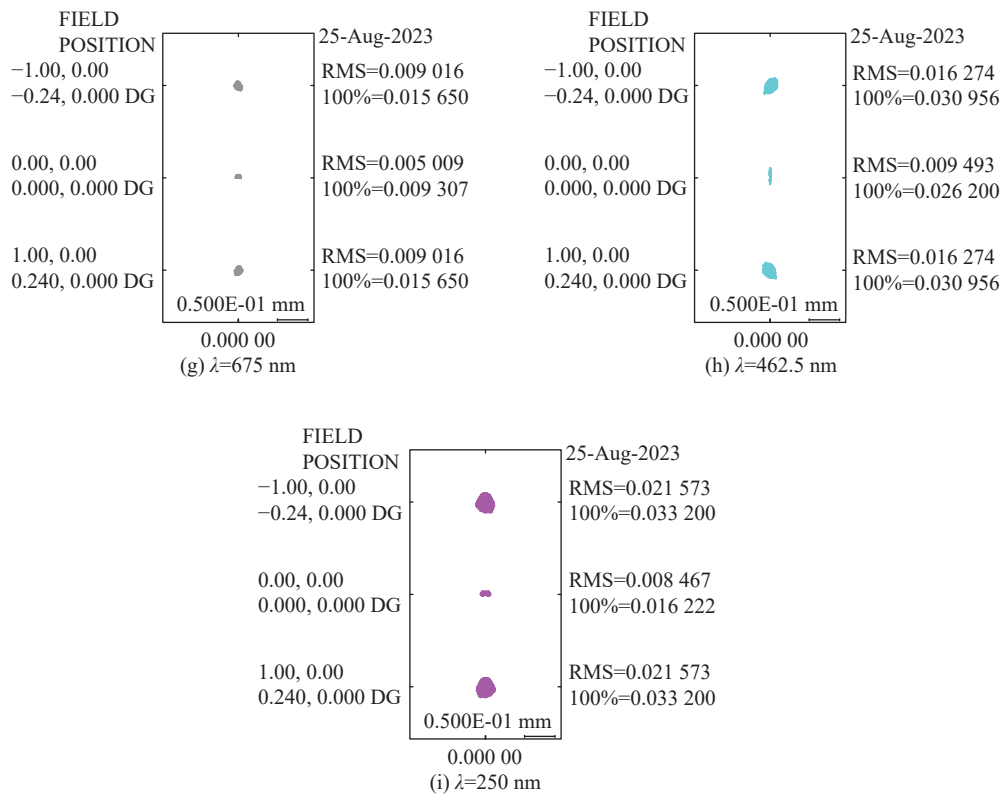


图 13 光谱仪点列图

Fig. 13 Spot diagram of of the spectrometer

对成像光谱仪的 3 个中心波长 (939 nm、764.5 nm、462.5 nm) 进行公差分析。通过测试光学系统的公差灵敏度, 确保光学系统具有一定的工程应用价值。在系统中给定公差值后, 得到 3 个波长处的结果, 如图 14(彩图见期刊电子版) 所示。可以看出: 在波长值为 939 nm 时, 整体系统 80% 以上 MTF 值大于 0.32; 当波长为 764.5 nm 时, 整体系统 80% 以上的 MTF 值大于 0.52; 当波长为 462.5 nm 时, 整体系统 80% 以上的 MTF 值大于 0.3, 满足系统实际应用要求。

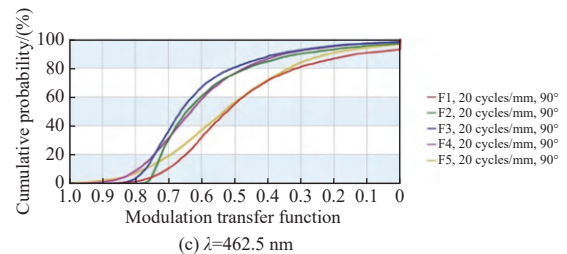
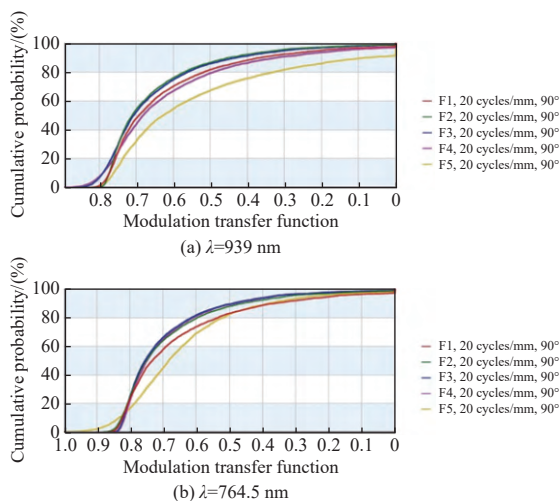


图 14 光谱仪公差分析图

Fig. 14 Tolerance analysis of the spectrometer ($\lambda=939$ 、764.5、462.5 nm)

5 结 论

本文设计了一款用于掩星探测的高光谱成像光谱仪, 以恒星为自然光源, 结合其他日照区的载荷, 可实现对痕量气体的全天时、较高信号强度测量。光谱仪采用双通道结构, 紫外-可见光通道只使用一块凹面反射光栅, 结构简单。红外通道采用利特罗自准直结构和浸没光栅, 有效减小了该通道的体积与尺寸。

最终结果表明: 整个光谱仪系统 F 数为 8.26、系统焦距为 950 mm、全视场为 0.48°、狭缝长度

为 7.96 mm。其中紫外-可见光通道工作波段为 250~675 nm、光谱分辨率优于 1 nm、在奈奎斯特频率为 20 lm/mm 处, MTF 曲线数值均大于 0.58, 全视场各波长 RMS 最大值为 21 μm ; 红外通道工作波段为 756~952 nm、光谱分辨率优于 0.2 nm、

在奈奎斯特频率为 20 lm/mm 处, MTF 曲线数值均大于 0.76, 且接近衍射极限, 全视场各波长 RMS 最大值为 6 μm 。整体设计符合设计与应用要求, 为痕量气体的掩星探测提供了一种高光谱成像光谱仪结构。

参考文献:

- [1] YE X, YI X L, LIN CH, *et al.*. Instrument development: Chinese radiometric benchmark of reflected solar band based on space cryogenic absolute radiometer[J]. *Remote Sensing*, 2020, 12(17): 2856.
- [2] 刘明言, 石秀顶, 李天国, 等. 电化学分析方法检测重金属离子研究进展[J]. *应用化学*, 2023, 40(4): 463-475.
LIU M Y, SHI X D, LI T G, *et al.*. Research progress in detection of heavy metal ions by electrochemical analysis[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2023, 40(4): 463-475. (in Chinese).
- [3] THUILLIER G, ZHU P, SNOW M, *et al.*. Characteristics of solar-irradiance spectra from measurements, modeling, and theoretical approach[J]. *Light: Science & Applications*, 2022, 11(1): 79.
- [4] 朱嘉诚, 陆伟奇, 赵知诚, 等. 静止轨道中波红外成像光谱仪分光成像系统[J]. *光学学报*, 2021, 41(11): 1122001.
ZHU J CH, LU W Q, ZHAO Z CH, *et al.*. Spectroscopic imaging system in mid-wave infrared imaging spectrometer on geostationary orbit[J]. *Acta Optica Sinica*, 2021, 41(11): 1122001. (in Chinese).
- [5] FENG A W, ZHAO SH J, HAN J ZH, *et al.*. High spectral resolution compact Offner spectrometer based on the aberration-reduced convex holographic gratings recorded by spherical waves under Rowland circle mounting[J]. *Applied Optics*, 2022, 61(13): 3893-3900.
- [6] 谭奋利, 曾晨欣, 冯安伟, 等. 基于 Dyson 结构的新型快照式分光成像系统光学设计[J]. *光学学报*, 2022, 42(4): 0422002.
TAN F L, ZENG CH X, FENG A W, *et al.*. Optical design of novel snapshot spectral imaging system based on Dyson structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(4): 0422002. (in Chinese).
- [7] DILS B, BUCHWITZ M, REUTER M, *et al.*. The greenhouse gas climate change initiative (GHG-CCI): comparative validation of GHG-CCI SCIAMACHY/ENVISAT and TANSO-FTS/GOSAT CO₂ and CH₄ retrieval algorithm products with measurements from the TCCON[J]. *Atmospheric Measurement Techniques*, 2014, 7(6): 1723-1744.
- [8] REMUND Q P, NEWELL D, RODRIGUEZ J V, *et al.*. The Ozone Mapping and Profiler Suite (OMPS): on-orbit calibration design[J]. *Proceedings of SPIE*, 2004, 5652: 165-173.
- [9] SOUCY M A A, CHATEAUNEUF F, DEUTSCH C, *et al.*. ACE-FTS instrument detailed design[J]. *Proceedings of SPIE*, 2002, 4814: 70-81.
- [10] 钟美, 皮波, 余勇, 等. FY-3B TOU 与 Aura OMI 卫星臭氧总量产品的比对分析[J]. *气象研究与应用*, 2021, 42(2): 29-34.
ZHONG M, PI B, SHE Y, *et al.*. Comparative analysis of total ozone products between FY -3B TOU and Aura OMI satellite[J]. *Journal of Meteorological Research and Application*, 2021, 42(2): 29-34. (in Chinese).
- [11] 邵春沅, 顾明剑, 漆成莉, 等. 风云三号 D 星红外高光谱大气探测仪零光程差检测[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(12): 2573-2580.
SHAO CH Y, GU M J, QI CH L, *et al.*. Detection of zero path difference position for FY-3D hyper-spectral in frared atmospheric sounder[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(12): 2573-2580. (in Chinese).
- [12] 曹西凤, 李小英, 罗琪, 等. 星载红外高光谱传感器温度廓线反演综述[J]. *遥感学报*, 2021, 25(2): 577-598.
CAO X F, LI X Y, LUO Q, *et al.*. Review of temperature profile inversion of satellite-borne infrared hyperspectral sensors[J]. *National Remote Sensing Bulletin*, 2021, 25(2): 577-598. (in Chinese).
- [13] 张璐, 李博, 李寒霜, 等. 超光谱分辨率紫外双通道共光路成像光谱仪设计[J]. *中国光学(中英文)*, 2022, 15(5): 1029-1037.
ZHANG L, LI B, LI H SH, *et al.*. Hyperspectral resolution ultraviolet dual channel common optical path imaging spectrometer[J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(5): 1029-1037. (in Chinese).
- [14] 李寒霜, 李博, 李昊晨, 等. 基于一种透镜材料的宽波段紫外成像仪光学设计[J]. *中国光学*, 2022, 15(1): 65-71.
LI H SH, LI B, LI H CH, *et al.*. Optical design of a wide-spectrum ultraviolet imager based on a single material[J].

Chinese Optics, 2022, 15(1): 65-71. (in Chinese).

- [15] SZUMSKI R, WALKER D D. The immersed echelle-I. Basic properties[J]. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1999, 302(1): 139-144.
- [16] CU-NGUYEN P H, GREWE A, FEßER P, *et al.*. An imaging spectrometer employing tunable hyperchromatic microlenses[J]. *Light: Science & Applications*, 2016, 5(4): e16058.

作者简介:



李博(1981—), 男, 吉林梨树人, 博士, 研究员, 2011 年于中国科学院大学获得博士学位, 主要从事高光谱遥感总体设计方面的研究。E-mail: libo0008429@163.com