

offner 型连续变焦中波红外光谱成像系统设计

刘智颖*, 高柳絮, 黄蕴涵

(长春理工大学 光电工程学院 光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022)

摘要: 为了适应不同视场光谱仪的应用需求, 设计了一款 offner 型连续变焦中波红外光谱成像系统。该系统引入前置变焦系统实现 60~300 mm 范围连续变焦, 同时采用光栅型 offner 同心结构进行光谱分光及成像, 系统工作波段为 3~5 μm , 选用制冷型红外探测器, 系统 $F\#=4.0$ 。根据物像交换原则及光焦度分配原则对前置变焦系统和中继系统的初始结构进行了计算, 并应用 zemax 软件对各子系统进行优化, 使其满足设计参数要求。最终 offner 型连续变焦中波红外光谱成像系统的调制传递函数在空间频率 33 lp/mm 处接近衍射极限, 点列斑均方根半径均小于一个像元大小, 设计的结果显示系统结构简单, 在各个焦距位置及各谱段下, 像质均满足了设计指标要求, 成像质量良好。

关键词: 光谱成像; 连续变焦; 中波红外系统; 冷光阑匹配

中图分类号: TH741 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201948.0718003

Design of continuous zoom medium-wave infrared spectral imaging system based on offner scheme

Liu Zhiying*, Gao Liuxu, Huang Yunhan

(Key Laboratory of Optoelectric Measurement and Optical Information Transmission Technology of Ministry of Education, School of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to adapt to the application requirements of different field of view spectrometers, a continuous zoom medium-wave infrared spectrum imaging system based on offner scheme was designed. The front zoom system to achieve continuous zoom in the range of 60–300 mm was introduced in the system, and a grating-type offner concentric structure was used for spectral splitting and imaging. The working band was 3–5 μm , the cooled medium-wave infrared detector was used, the $F\#=4.0$ in this system. According to the object image exchange principle and the power distribution principle, the initial structure of the front zoom system and the relay system were calculated, and the zemax software was used to optimize each subsystem to meet the design parameters. The modulation transfer function of the final continuous zoom medium-wave infrared spectrum imaging system based on offner scheme was close to the diffraction limit at a spatial frequency of 33 lp/mm, and the root mean square radius of the spot was smaller than one pixel. The design results show that the system structure is simple, and the image quality is good and meets the design indicator requirements at each focal length position and each spectral segment.

Key words: spectral imaging; continuous zoom; medium wave infrared system; matching of cold stop

收稿日期: 2019-02-10; 修订日期: 2019-03-20

基金项目: 国家自然科学基金(11474037)

作者简介: 刘智颖(1981-), 女, 教授, 博士, 主要从事光学设计与检测方面的研究。Email: lzy@cust.edu.cn

0 引言

红外光学系统具有隐蔽性好、抗干扰能力强以及在一定程度上能够识别伪装目标等特点^[1-2]。光谱成像技术是光谱分析技术和图像分析技术发展的必然结果,是二者完美结合的产物,光谱成像技术不仅具有光谱分辨能力,还具有图像分辨能力,利用光谱成像技术不仅可以对物体进行定性和定量分析,而且还能对其进行定位分析^[3]。连续变焦中波红外光谱成像系统更被广泛应用在大气科学、地质、天文、生态和海洋等学科,其在识别目标、资源调查、精细农业和生物医学等众多领域也具有广泛的应用前景。另外由于连续变焦距光学系统可以在连续变焦过程中,在无需调整系统的位置情况下始终保持像面上接收到的目标物体的清晰图像,避免丢失快速运动的目标,是红外成像系统同时解决大视场搜索目标和小视场观察目标的最佳选择,所以若把连续变焦距光学系统与光谱成像系统相结合,将变焦光学系统应用到光谱成像系统当中,就可以更有效地提高系统的探测效率^[4-7]。

文中基于像素为 640×480 的中红外制冷型焦平面阵列探测器设计了一个 offner 型连续变焦中波红外光谱成像系统,该系统是由前置变焦物镜和光栅型 offner 同心结构光谱成像系统构成,结构简单。此系统将变焦系统与红外光谱成像系统相融合,它具有连续变化的视场,可对目标进行连续成像,为光谱成像领域提供了一种新的应用方法,是未来红外光谱成像技术的发展方向,具有广阔的应用前景。

1 offner 型连续变焦中波红外光谱成像系统设计原理

连续变焦中波红外光谱成像系统分别由前置变焦系统和光谱成像系统两个部分组成,如图 1 所示。

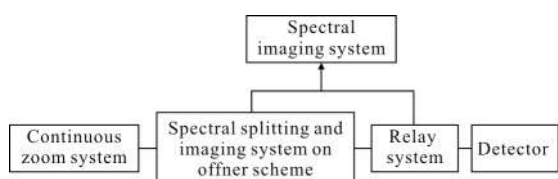


图 1 offner 型连续变焦中波红外光谱成像系统示意图

Fig.1 Schematic of continuous zoom medium-wave infrared spectral imaging system based on offner scheme

在实际使用过程中,二者组合应用从而实现总体光谱成像的目的。根据要求计算出具体参数指标要求,并得到初始结构。对各子系统进行优化设计,然后将子系统拼接完成最终的 offner 型连续变焦中波红外光谱成像系统的设计。

1.1 连续变焦系统的设计原理

变焦光学系统是通过变倍组和补偿组的相对移动在一定的焦距范围内实现变倍且保持像面稳定的,其补偿方式包含光学补偿及机械补偿两种方式。光学补偿型的变焦光学系统结构简单,但所有移动透镜组一起作线性移动,变焦过程中像平面发生微位移,不能得到完全补偿;机械补偿型的变焦光学系统,变倍组作线性移动,补偿组作非线性移动,克服像面漂移,达到变倍过程中像面位置稳定的要求^[8]。

机械补偿方式又可以分为正组补偿和负组补偿。正组补偿型变焦系统前固定组的焦距较长、系统长度较长、二级光谱较小,负组补偿型变焦系统前固定组焦距较短、系统长度较短、二级光谱较大。由于文中所设计的系统长焦距为 300 mm,焦距较长,对于大视场或长焦距的光学系统而言,要求镜头通光口径不能过大,并且系统的二级光谱要小,采用正组补偿式的结构成像质量比较好^[9],因此,该系统的初始结构采用正组补偿形式。

1.2 光谱成像系统的设计原理

光谱成像系统包含 offner 型光谱分光成像系统和中继系统两部分。

分光元件是光谱成像系统中的核心部分,分光元件的性能直接决定了系统光谱成像的质量。常见的分光模式有色散型和干涉型,色散型所使用的色散元件主要有:色散棱镜、干涉滤光片、平面闪耀光栅等。与传统成像光谱系统相比,基于 offner 型同心结构光谱成像系统的分光元系统仅由 3 个光学元件组成,具有大孔径、低光学畸变、结构简单、易于实现小型化的特性,这大大降低了成像光谱仪的设计难度和后端数据处理的复杂度,提高了光谱成像分析的准确度。

另外由于 offner 型分光成像系统的结构是同心、对称的,系统的初级球差、彗差、畸变都得到校正,且当反射镜的半径为凸面光栅半径 2 倍时,当入射为平行光束时出射也为平行光束,它既是物方远

心光路,也是像方远心光路,系统的总光焦度为 0,初级像散和场曲也得到校正。且由于采用全反射式结构,系统不存在色差,可见,此结构的特点是初级像差都趋于零^[10-13]。所以文中设计了将凸面光栅作为核心元件的 offner 型光谱分光成像系统。

由于系统采用制冷焦平面探测器作为接收器,需要考虑冷光阑匹配及变焦过程中像面漂移问题,所以系统采用中继系统二次成像来实现冷光阑匹配,同时为了简化设计中继系统选取放大倍率为 1

的目镜形式进行设计。

2 offner 型连续变焦中波红外光谱成像系统的设计

2.1 系统主要性能指标及设计参数

根据实际应用需求,选用 Sofradir 公司生产的 640 pixel × 480 pixel 的红外制冷型焦平面探测器,单个像素尺寸为 15 μm × 15 μm。该设计的指标参数如表 1 所示。

表1 光学设计参数

Tab.1 Optical design parameters

Working spectrum/ μm	Stop shield aperture/ mm	Paraxial image height/mm	Focal length of zoom system/mm	Spectral resolution/ nm	Subsystem F#
3-5	5.1 mm+0.05/+0.1	3.5	60-300	25	4

2.2 连续变焦系统光学设计

图 2 所示为变焦系统示意图,根据物像交换原则可知,在变倍组和补偿组移动时遵循变焦方程式(1),同时满足变倍比公式(2)。

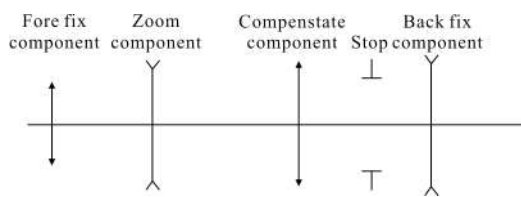


图 2 变焦系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of zoom system

$$C = \left(m_{20} + \frac{1}{m_{20}} \right) f'_2 + \left(m_{30} + \frac{1}{m_{30}} \right) f'_3 \quad (1)$$

$$\Gamma = \frac{m_2 * m_3}{m_{20} * m_{30}} \quad (2)$$

式中: C 为常数; m_i 、 m_{i0} 为不同状态时变倍组和补偿组的放大倍率。

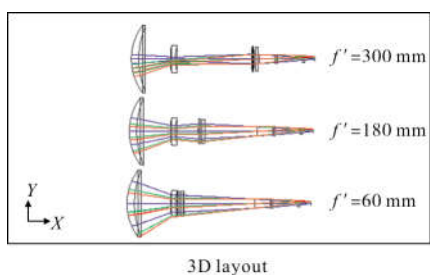
再根据经验留足变倍和调焦的余量,可以得到不同状态时的焦距和各组元之间的间距,计算结果如表 2 所示。

将前面计算得到的变焦系统初始结构进行优化。对于前置变焦系统设计,为了提高成像光谱系统的数值孔径同时避免产生渐晕,系统设计应满足以下要求:具有物方远心结构;与凸面光栅分光系统 F# 匹配;采用透射式光学系统设计,能够得到较大的视场和相对孔径^[14]。图 3 所示为不同焦距下的系统结构示意图,图 4、5 为系统在不同焦距下对应的点列图及 MTF 图。

表 2 变焦系统初始结构参数

Tab.2 Initial structural parameters of zoom system

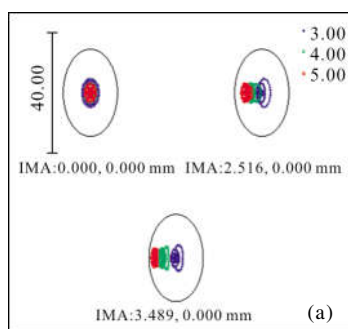
Focal length of each element					
f'_1 /mm		f'_2 /mm		f'_3 /mm	
266.306 2		-84.232 1		109.501 8	
612.593 9					
Long focal length/mm		Middle focal length/mm		Short focal length/mm	
300		213		60	
d12c/mm	111.880 6	d12z/mm	97.842 0	d12d/mm	16.846 4
d23c/mm	17.506 3	d23z/mm	50.539 3	d23d/mm	180.543 5
d34c/mm	84.849 4	d3z/mm	65.855 1	d34d/mm	16.846 4



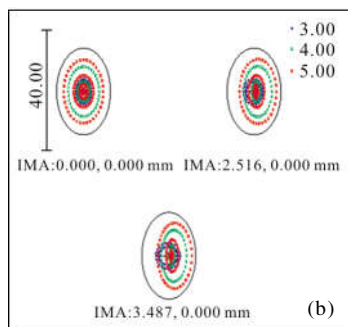
3D layout

图 3 不同焦距下的系统结构示意图

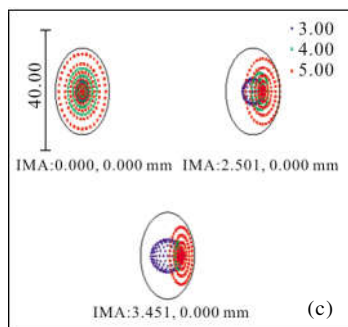
Fig.3 Schematic diagram of system structure at different focal lengths



Spot diagram



Spot diagram



Spot diagram

图 4 不同焦距下点列图

Fig.4 Spot diagram of different focal lengths

图 4~5 表明在变焦系统的不同焦距下的点列斑半径均小于一个像元大小且在爱里斑内部,MTF 曲线均接近衍射极限,系统成像质量好。

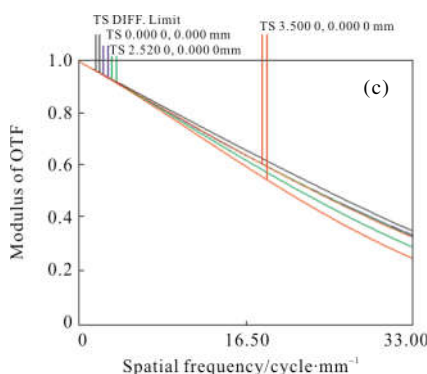
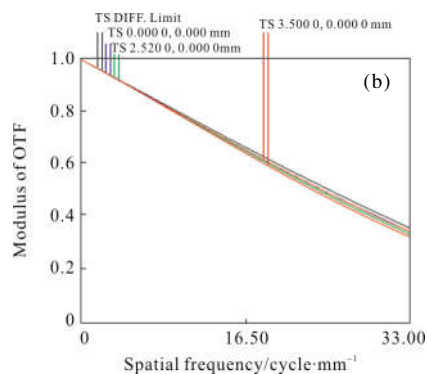
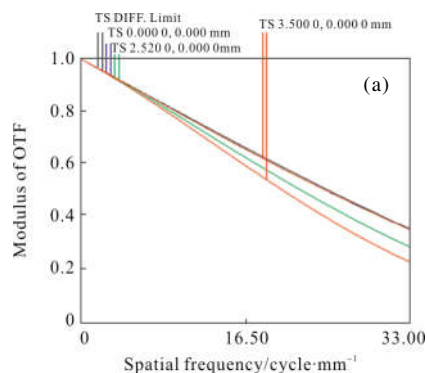


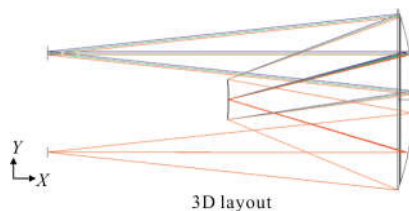
图 5 不同焦距下 MTF 曲线

Fig.5 MTF curves of different focal lengths

2.3 光谱成像系统光学设计

2.3.1 offner 型分光成像系统

文中采用凸面光栅作为核心分光元件的 offner 型光谱成像系统进行分光设计,图 6 为 offner 型光



3D layout

图 6 offner 型分光成像系统结构示意图

Fig.6 Structure diagram of spectral splitting and imaging system based on offner scheme

谱分光成像系统结构示意图,图 7、图 8 分别是不同波长下光谱成像系统点列图及 MTF 曲线。

图 7~8 表明 offner 型光谱分光成像系统不同波长下的点列斑均小于一个像元大小,MTF 曲线均接近衍射极限,系统结构简单,成像质量良好。

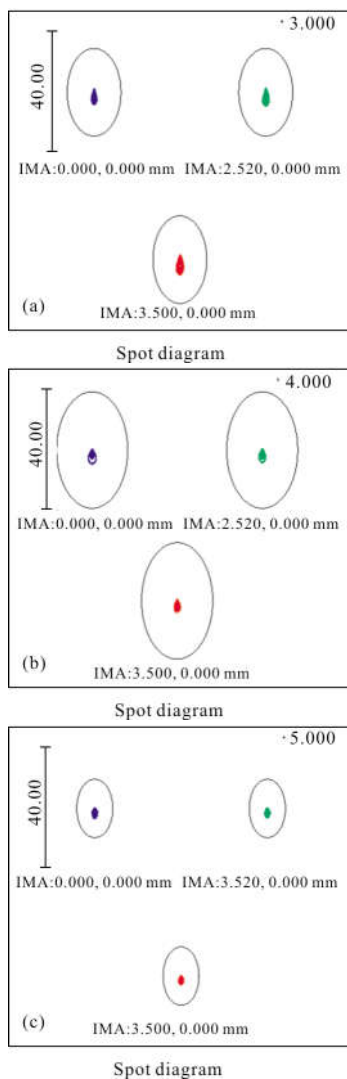


图 7 不同波长下的点列图

Fig.7 Spots of different wavelengths

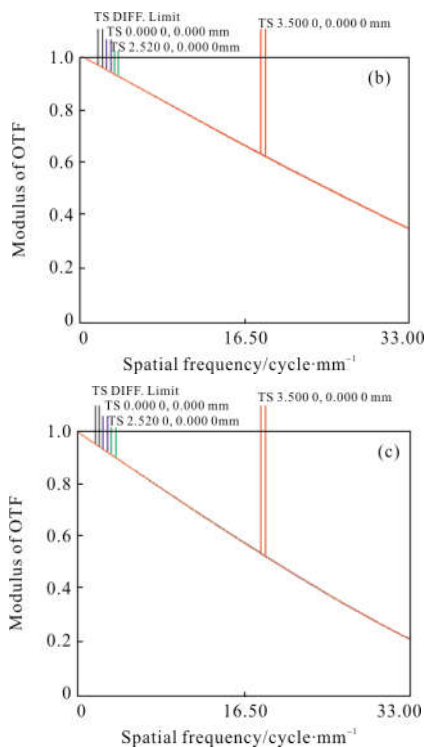
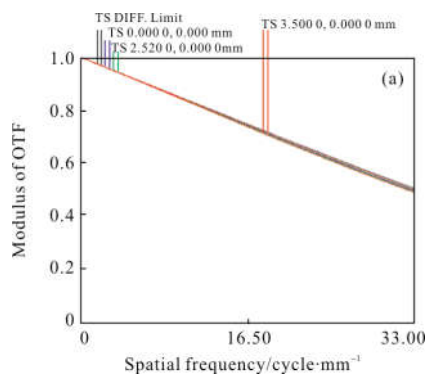


图 8 不同波长下 MTF 曲线

Fig.8 MTF curves of different wavelengths

2.3.2 中继系统

由于该设计采用中继系统实现冷光阑匹配,所以根据光焦度分配原则计算中继系统初始结构,再进一步优化。

假设中继系统由两个组元组成,且每个组元又由两个透镜组成,如图 9 所示,其中 L_1 为两组元之间的距离, h_1 和 h_2 是光线到每一个组元的高度, c_i 为每个折射面的曲率。

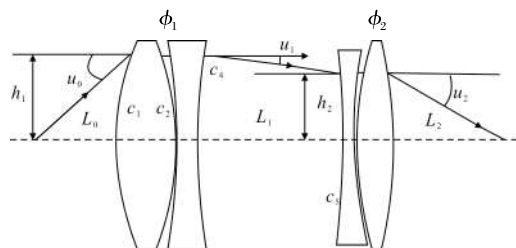


图 9 中继系统示意图

Fig.9 Schematic diagram of relay system

所以由图 9 可知:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2 - L_1 \Phi_1 \Phi_2 \quad (3)$$

$$\frac{h_1 \Phi_1}{v_1} + \frac{h_2 \Phi_2}{v_2} = 0 \quad (4)$$

当给定 u_0 、 L_0 、 L_1 及 L_2 , 再根据经验和查阅资料给定透镜材料时, 即可求出 Φ_1 和 Φ_2 及中继系统的其他参数。文中由 $F\#=4$ 可知, $u_0=0.125$; 由于文中使用红外制冷型探测器可有效抑制光谱系统自身热辐射引入的噪声, 提高光谱系统的探测能力^[15], 该探测器要求光阑到探测面的距离约为 20.27 mm, 所以设

$L_0=L_1=L_2=20$ mm; 四片透镜材料分别选取硅、锗、锗、硅, 并设每一个透镜的两个曲率为相反数, 则所求结果如表 3 所示。

优化后得到结果如图 10(a)~(c)所示, 其中图 10(a) 为中继系统结构示意图、图 10(b) 为系统点列图、图 10(c) 为 MTF 曲线。

表 3 中继系统初始结构参数

Tab.3 Initial structural parameters of relay system

ϕ_1 /mm				ϕ_2 /mm			
21				20			
Si		Ge		Si		Ge	
11.473		-25.289		0.834		0.568	
$1/c_1$ /mm	$1/c_2$ /mm	$1/c_3$ /mm	$1/c_4$ /mm	$1/c_5$ /mm	$1/c_6$ /mm	$1/c_7$ /mm	$1/c_8$ /mm
55.650 45	-55.650 45	-153.001 35	153.001 35	-145.715 57	145.715 57	53.000 429	-53.000 429

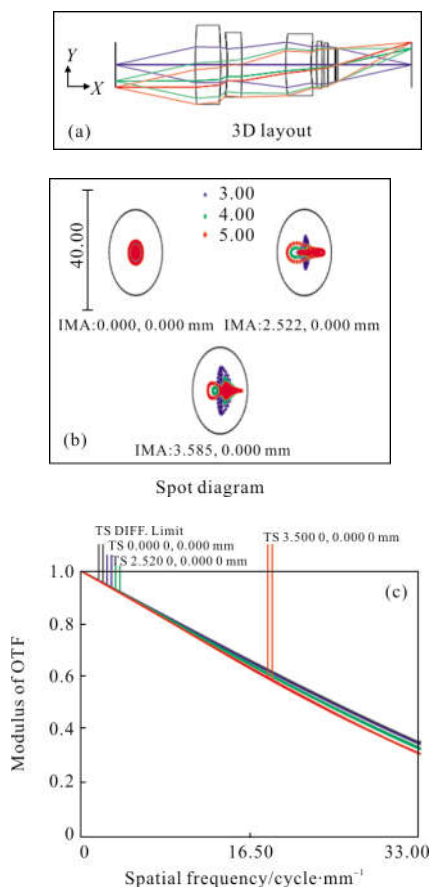


图 10 (a) 中继系统结构示意图; (b) 中继系统点列图; (c) 中继系统 MTF 曲线

Fig.10 (a) Structure diagram of relay system; (b) spots of relay system; (c) MTF of relay system

图 10 表明: 中继系统的点列斑小于一个像元大小, MTF 曲线均接近衍射极限, 系统成像质量好。

3 光学系统设计结果及像质评价

将上一章优化设计的子系统进行拼接, 完成最终的 offner 型连续变焦中波红外光谱成像系统优化设计, 其设计结果如下图所示。其中, 图 11 为最终系统结构示意图。

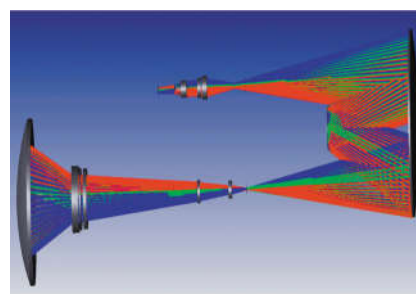


图 11 最终系统结构示意图

Fig.11 Structure diagram of final system

图 12、图 13 分别为系统不同焦距、不同谱段下的点列图及 MTF 曲线。

图 12~13 表明最终组合系统的光谱分辨率达到 25 nm, MTF 曲线均接近衍射极限, 系统成像质量好, 结构简单。

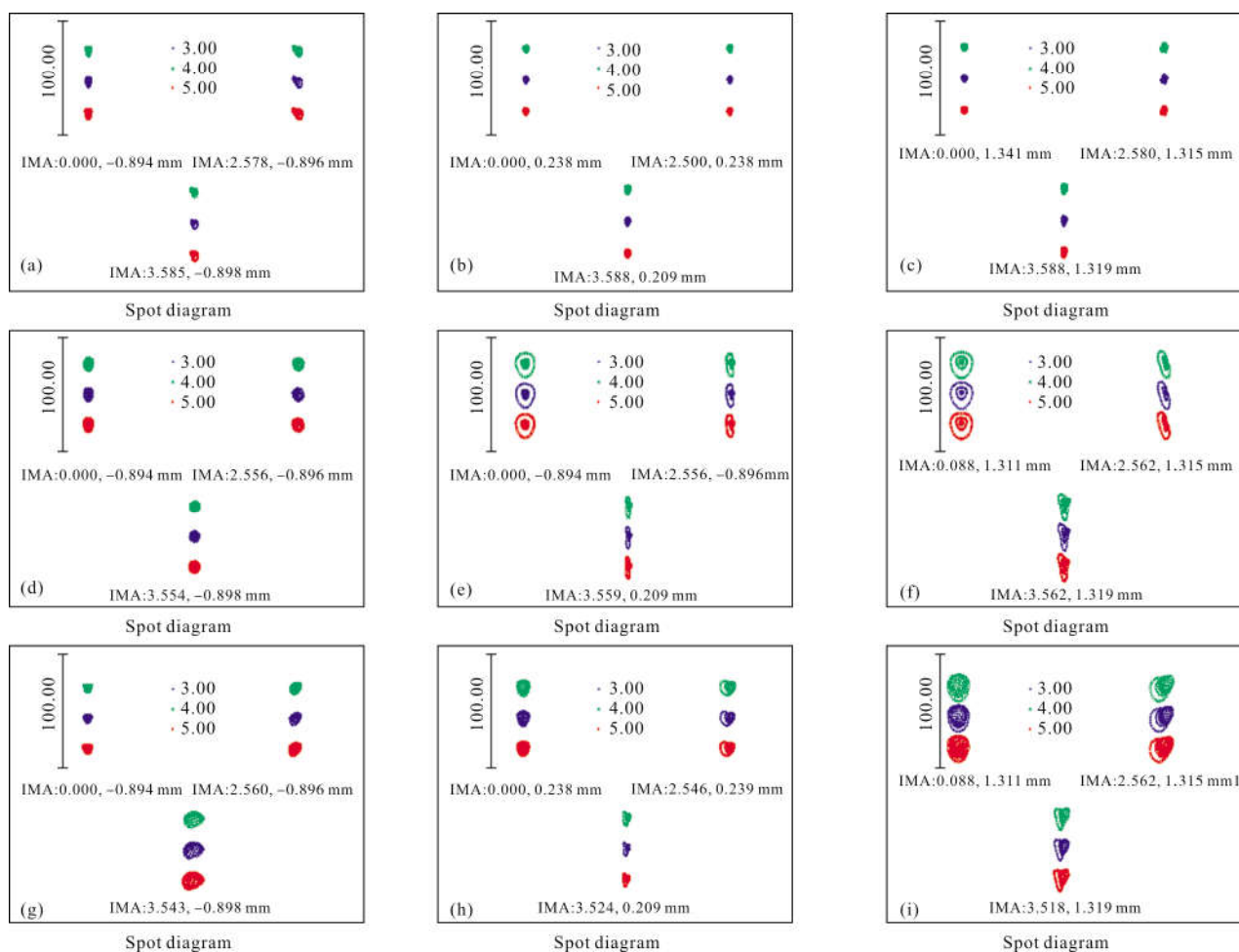
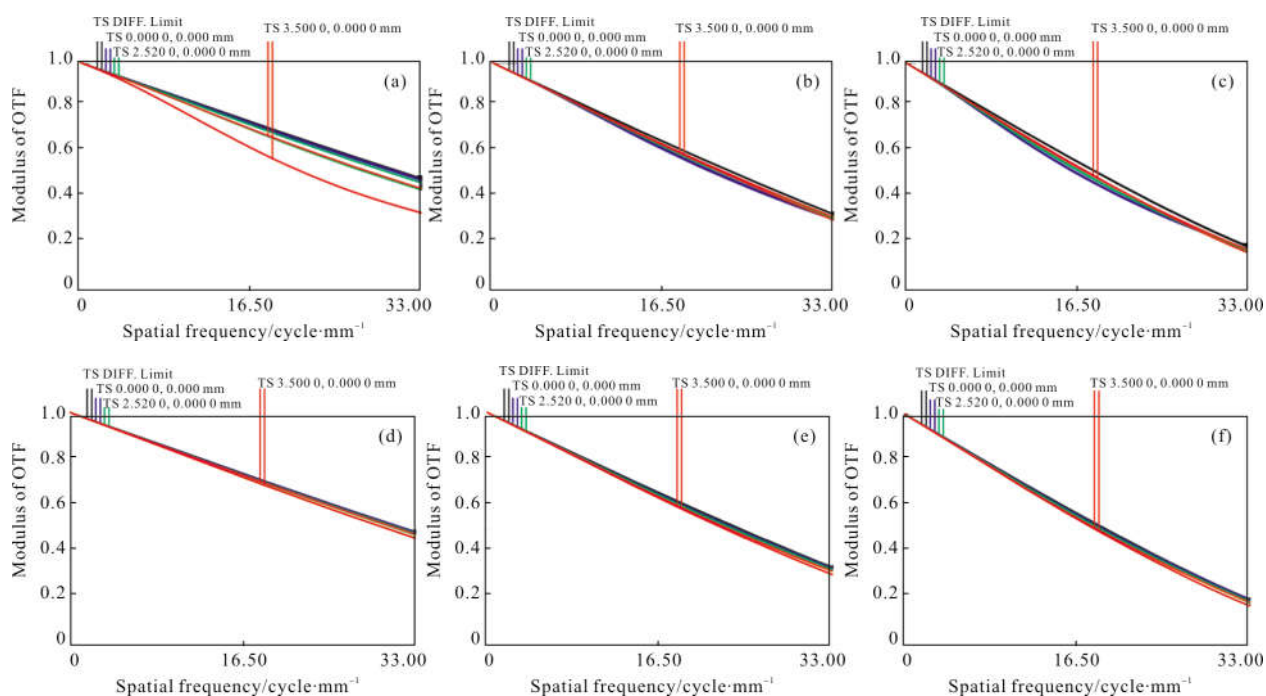


图 12 不同焦距不同波长下的点列图

Fig.12 Spots of different focal lengths and wavelengths



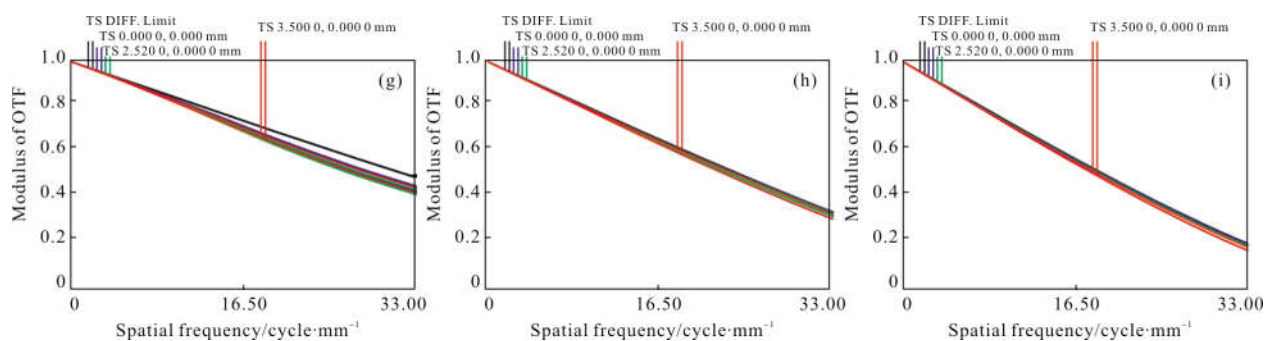


图 13 不同焦距不同波长下的 MTF 曲线

Fig.13 MTF of different focal lengths and wavelengths

4 结论

文中设计的 offner 型连续变焦中波红外光谱成像系统,引入前置连续变焦系统,实现光谱成像过程中视场连续变化。采用的 offner 型光栅分光成像系统具有球差、彗差、畸变、像散、场曲及色差等初级像差都趋于零的特点。最后利用二次成像中继系统实现冷光阑匹配,降低系统冷反射。优化后各子系统设计结果均满足参数要求,成像质量良好。系统的点列斑均方根半径均小于一个像元大小,且不同焦距不同波段下的 MTF 在截止频率处均接近衍射极限,光谱分辨率达到 25 nm,具有较好的光谱分光性能。

参考文献:

[1] Zhou Hao, Liu Ying, Sun Qiang. Mid-infrared zoom optical system with ration of 25[J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(4): 0422001. (in Chinese)
周昊, 刘英, 孙强. 25 倍中红外连续变焦光学系统设计[J]. *光学学报*, 2012, 32(4): 0422001.

[2] Liu Feng, Xu Xiping, Sun Xiangyang, et al. Design of infrared (IR) Hybrid refractive/diffractive lenses for target detecting/tracking [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(7): 2084-2088. (in Chinese)
刘峰, 徐熙平, 孙向阳, 等. 折/衍射混合红外目标搜索/跟踪光学系统设计[J]. *光学学报*, 2010, 30(7): 2084-2088.

[3] 高光谱, 多光谱及超光谱[DB/OL]. (2013-02-06)[2018-11-12]https://wenku.baidu.com/view/50f099f6f61fb7360b4c653e.html.

[4] Chen Lvji, Li Ping, Ma Lin. Compact MWIR zoom

system[J]. *Infrared Technology*, 2010, 32(10): 562-566. (in Chinese)
陈吕吉, 李萍, 马琳. 紧凑中波红外连续变焦光学系统设计[J]. *红外技术*, 2010, 32(10): 562-566.

[5] Gong Dun, Wang Hong. Optical design of hyperspectral imaging spectrometer on space [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(2): 541-545. (in Chinese)
巩盾, 王红. 空间高光谱成像仪的光学设计 [J]. *红外与激光工程*, 2014, 43(2): 541-545.

[6] Hu Jixian. Design of long focal length large-aperture optical zoom system [J]. *Applied Optics*, 2007, 28(5): 569-577. (in Chinese)
胡际先. 长焦距大口径连续变焦光学系统的设计[J]. *应用光学*, 2007, 28(5): 569-577.

[7] Kong H J, Jin C, Lee J U, et al. Zoom lens design for a novel imaging spectrometer that controls spatial and spectral resolution individually [J]. *Appl Opt*, 2006, 45(15): 3430-3441.

[8] Yu Daoyin, Tan Hengying. Engineering Optics [M]. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2011. (in Chinese)
郁道银, 谈恒英. *工程光学* [M]. 第 3 版. 北京: 机械工业出版社, 2011.

[9] Yu Chunling. Research on design of zoom lens [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2013. (in Chinese)
于春玲. 变焦距光学系统设计 [D]. 南京: 南京理工大学, 2013.

[10] Mouroulis P, Thomas D A, Chrien T G, et al. Trade studies in multi/hyperspectral imaging systems final report[R]. USA: Nasa Earth Science Technology Office, 1998.

[11] Huang Yuanshen, Chen Nanshu, Zhang Dawei, et al.

- Design method for Offner imaging spectrometer composed of convex grating [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, 29(6): 1236–1239. (in Chinese)
- 黄元申, 陈南曙, 张大伟, 等. 一种凸面光栅 Offner 结构成像光谱仪的设计方法 [J]. *仪器仪表学报*, 2008, 29(6): 1236–1239.
- [12] Liu Yujuan, Cui Jicheng, Ba Yinhexige, et al. Design and application of imaging spectrometer with convex grating[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(1): 52–57. (in Chinese)
- 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.
- [13] Yang Jin. The study on optical design and optimization of concentric imaging spectrometers [D]. Changchun: Graduate University of Chinese Academy of Sciences (Key Laboratory of Airborne Optical Imaging and Measurement, Changchun Institute of Optics), 2012. (in Chinese)
- 杨晋. 光谱成像仪同心光学系统设计与优化研究 [D]. 长春: 中国科学院研究生院 (长春光学精密机械与物理研究所), 2012.
- [14] Fisher J, Welch W C. Survey and analysis of fore-optics for hyperspectral imaging systems [C]// Proceedings of SPIE –The International Society for Optical Engineering, 2006, 6206: 62062R.
- [15] Zhang Yue, Zhang Zhuo, Su Yun, et al. Cooling system design for cryogenic imaging spectrometer with wide spectrum and high resolution [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(3): 0323001. (in Chinese)
- 张月, 张琢, 苏云, 等. 宽谱段高分辨率低温成像光谱仪制冷系统设计[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(3): 0323001.