

可见光、中/长波共口径共焦距光学系统设计

高明,刘彬彬,刘钧,吕宏
(西安工业大学光电工程学院,陕西西安710021)

摘要:为满足系统对环境探测的高分辨率、高准确性,提高光学系统在复杂环境下的探测能力,同时针对多波段光学系统光路转换速度慢、不同波段目标信息存在差异的问题,设计了一种可见光、中/长波三波段共口径、共焦距光学系统。三个波段共用一组光路,系统同时接收可见光、中/长波三个波段的目标信息,通过焦距补偿使得三个波段焦距相等,提高三个波段目标信息的一致性。系统焦距为12 mm,视场为 36° ,可见光波段在奈奎斯特频率为80 lp/mm时传函值高于0.53,中红外波段在奈奎斯特频率为20 lp/mm时传函值高于0.5,长红外波段在奈奎斯特频率为20 lp/mm时传函值高于0.36,系统整体成像质量良好,在 $-40 \sim 60^\circ\text{C}$ 温度范围内对系统消热差。

关键词:三波段;共口径;共焦距;消热差

中图分类号:TH74 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2015.03.015

Design of visible light, medium/long-infrared tri-band shared-aperture and con-focal optical system

GAO Ming, LIU Bin-bin, LIU Jun, LÜ Hong

(School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: In order to meet the high resolution, high accuracy of environmental detection, to improve the detection capability in complex environment and to solve the problems that the conversion speed of the optical path was slow for multi-band optical system and there were differences in the object information of different bands, an optical system that features visible light, medium / long-infrared light, shared aperture, con-focal was designed. The system can receive target informations of three bands at the same time. The focal length for visible, medium / long-infrared light is equal by focal length compensation, which improves the consistency of target information for three bands. The focal length is 12 mm and field of view is 36° . The transfer function value is >0.53 for visible light at 80 lp/mm Nyquist frequency; the transfer function value is >0.5 for mid-infrared light at 20 lp/mm and the transfer function value is >0.36 for long-infrared light at 20 lp/mm. The system has an excellent overall image quality and is athermal for temperatures between -40°C and $+60^\circ\text{C}$.

Key words: tri-band; shared aperture; con-focal; athermalization

1 引言

近年来,随着社会需求的快速发展以及应用环境的日趋复杂,在导航、搜索、跟踪、警戒、侦查等领域,单一波段的侦察已经很难满足各种各样的需

求^[1-4]。由于目标在不同光谱波段表现的光学特征有较大差异,因而可以利用多波段来实现全天候、高分辨率的目标侦察。三波段系统能够全天候侦查,精确、全面获取目标信息,此外将三个波段采集的目

基金项目:陕西省教育厅重点实验室科学研究计划项目(No. 14JS034)资助。

作者简介:高明(1964-),男,教授,理学博士,从事光学设计理论及技术,光电精密测试技术,光大气传输理论及技术的科学研究工作。E-mail:13629297901@163.com

收稿日期:2014-09-30

标信息相融合,能够获得更加全面、精准的目标信息^[5-7]。由于三波段光学系统的上述优良性能,迅速成为当今世界各国竞相研究的前沿课题。文献[8]设计了一套波长为300~1100 mm的多波段光学系统,该系统能对目标的近紫外、可见光和近红外3个波段同时成像,近紫外、可见光和近红外波段共用一透镜组,同时利用一胶合棱镜组进行分光;文献[9]设计了一种反射/折射/衍射三波段混合成像系统,实现可见、中波红外与长波红外三个波段的融合成像。系统采用卡塞格林系统,但是这种折反系统一般视场较小、 F 数较大,仅适用于小视场系统中;文献[10]设计了一款非制冷红外双波段光学系统,系统采用了离轴三反形式,而采用离轴反射系统大大增加像差矫正难度和装配难度。

目前国内外对于可见光、红外双通道甚至多通道光学系统的研究较多,但通常是对可见与红外波段光学系统分开独立设计,然后组合成为多波段光学系统,这就导致了系统体积庞大,也增加了侦察设备整体的复杂程度^[11]。此外当外部观察环境变化,如目标被遮挡、伪装、烟雾干扰、昼夜交替,而进行光路和波段转换时,需要重新搜索目标,才能再次对目标进行观察,过程耗时长、系统反应慢,当跟踪、观测的目标移动速度较快时,还可能会丢失目标。另外,现有的多波段光学系统可见和红外系统的焦距一般不相同,这就意味着不同波段情况下的可观测距离不相同,当由一路光向另一路光转换后,很可能超出了观测距离而不能精确地跟踪和测量目标。

针对上述问题,本文设计了一款可见光、中/长波三波段共口径、共焦距光学系统,实现了在同一光路中可见光、中/长波三波段同时接收目标信息,大大减小了系统的复杂性,对实现系统的小型化、轻型化具有明显的优势。通过对可见光、中/长红外波段的共焦距设计,使三个波段的焦距相同,可以实现三个波段同步观测、同步跟踪、同步测量的目的。

2 光学系统结构形式

根据光学系统结构形式的不同,常用的多波段成像系统形式有反射式、折反射式和折射式^[12]。反射系统一般采用离轴三反结构,离轴三反系统避免了中心遮拦,不存在色差和二级光谱,可在很宽的谱段范围内成像,零件数相对较少,容易实现轻量化设计,被广泛应用在空间光学中。但反射式系统一般体积较大、加工装调较困难,此外如采用共轴反射系统则有遮拦,而采用离轴反射系统则大大增加像差矫正难度和装配难度;折反系统是将反射镜和透镜相结合,

主要是在如卡塞格林、马克苏托夫系统反射镜的基础上加入校正镜,进一步提高系统的视场和 F 数,但是这种折反系统一般视场较小、 F 数较大,仅适用于小视场系统中,应用范围非常有限;折射系统是目前应用最为广泛的光学系统,能满足大部分设计需求。与反射系统相比,折射式系统体积小、结构紧凑,且是设计、加工最为成熟的结构形式之一,并能满足大视场、大相对孔径的要求。比较这三种光学系统结构形式的优缺点,此次设计选择采用折射式结构。

3 系统设计

3.1 设计指标

系统设计能够实现可见光、中/长波三波段共口径、共焦距,考虑系统的轻型化和小型化的设计要求,系统总长设计小于350 mm。选择可见光探测器为CCD,像素为 960×720 ,像元尺寸为 $6.5 \mu\text{m} \times 6.5 \mu\text{m}$,中红外和长红外波段探测器都为非制冷焦平面阵列,像素为 320×256 ,像元尺寸为 $25 \mu\text{m} \times 25 \mu\text{m}$ 。主要光学技术指标如表1所示。

表1 光学设计指标

	可见光		中波红外		长波红外
波长	0.38~0.76 μm	波长	3~5 μm	波长	8~12 μm
视场	36°	视场	36°	视场	36°
$F\#$	4.6	$F\#$	4	$F\#$	2.1
焦距	12mm	焦距	12mm	焦距	12mm
温度	-40~60°C	温度	-40~60°C	温度	-40~60°C

3.2 系统结构设计

设计得到的可见光、中/长波三波段共口径光学系统结构图如图1所示。由于系统要求是三波段共口径,普通光学系统不能满足设计要求,为此对普通单波段光学系统进行改进设计,同时考虑系统在接收目标信息时,不同波段的目标信息需要不同的探测器接收,所以需要对三路光进行分光,最终得到改进后的系统共有七部分组成:公共透镜组A,此部分需要同时透过可见光、中波红外和长波红外,实现三个波段共口径;分光棱镜B,包括两个分光棱镜B1、B2,实现分光;焦距补偿组D、E,焦距补偿组D补偿

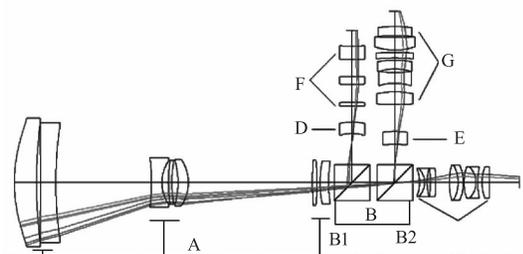


图1 三波段共口径光学系统结构图

中波红外与可见光波段焦距的差异,焦距补偿组 E 补偿长波红外与可见光波段焦距的差异;可见光像差矫正组 C、中波红外像差矫正组 F 和长波红外像差矫正组 G,C、F、G 分别校正可见光、中波红外和长波红外三个光路的像差,并且汇聚各自的光线成像在各自的探测器上。

3.3 光学系统共焦距设计

初始结构设计过程中,发现可见、中波和长波红外三个波段在各组元的焦距明显有差异,分析原因在于可见光、中波红外和长波红外波长范围相差较大,即使透过结构相同的透镜,也会因折射率的差异,导致三者焦距不同。由于初始结构各组元的焦距和间隔是依据可见光计算而得的,中波红外和长波红外各组元数据并不是计算得到,这就导致中波红外和长波红外波段焦距不能满足要求。

为了使得中波红外及长波红外波段的焦距与可见光波段的焦距相同,可以利用变焦系统设计思想^[13],通过在中波红外和长波红外各自的光路中增加一个焦距补偿组,通过补偿组的移动达到焦距补偿的目的。为了实现中波红外及长波红外波段的焦距和可见光波段的焦距相同,焦距补偿组应满足公式:

$$\phi_{MR} = \phi_{LR} = \phi_1 + \frac{h_2}{h_1}\phi_2 + \frac{h_3}{h_2}\phi_3 = \phi_v \quad (1)$$

式中, ϕ_v 为可见光部分的总光焦度; ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 分别为共口径部分、焦距补偿组和像差矫正组对应的光焦度; h_1, h_2, h_3 分别为光线在三个透镜组的入射高度; ϕ_{MR}, ϕ_{LR} 分别为中波红外、长波红外的总光焦度。此式的物理意义是补偿后中波红外及长波红外的总光焦度与可见光的相等。

对设计的初始结构进行分析,可以得到可见、中波和长波红外三个波段的焦距,如表 2 所示。由表可知,可见与中波、长波波段的焦距存在差异。

表 2 可见、中波和长波的焦距及焦距差

	焦距/mm
可见光	12
中波	13.04
长波	13.78
中波/可见焦距差	1.04
长波/可见焦距差	1.78

4 光学系统设计结果及像质评价

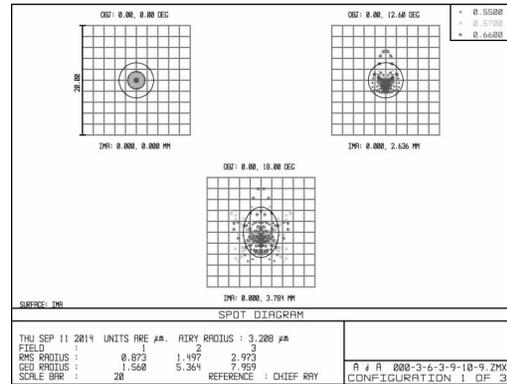
4.1 光学系统设计

设计的系统共口径部分使用 7 片透镜,可见光

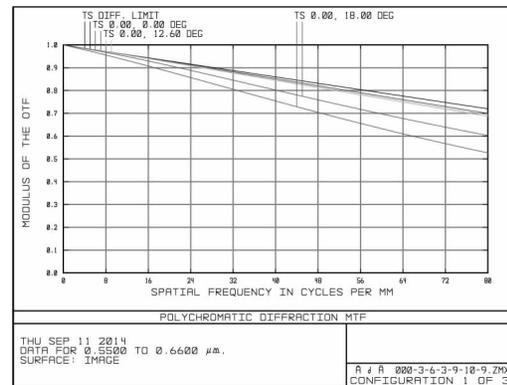
像差矫正组使用 8 片透镜,中波红外焦距补偿组与像差矫正组共使用 4 片透镜,长波红外焦距补偿组与像差矫正组共使用 7 片透镜,整个系统同时使用了两个分光棱镜,达到分光的目的。同时通过引入非球面与衍射面来校正系统的轴外像差和高级像差。系统总体积和单个系统的体积相当,与通常分开设计的多波段系统相比,体积大大地减小了,三个波段的能量集中度都在 80% 以上。

4.2 像质评价

系统可见波段点列图、调制传递函数图如图 2 所示。



(a)点列图

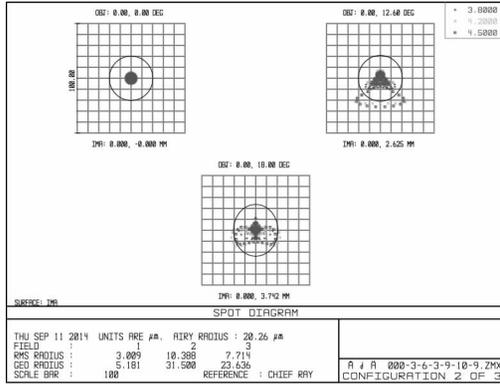


(b)传函图

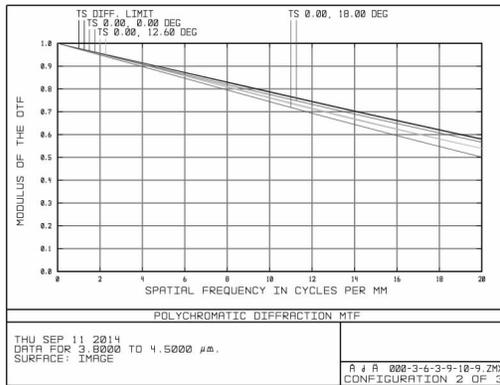
图 2 可见光波段的点列图、传函图

从点列图中可以看出,可见光弥散斑的均方值小于 $5 \mu\text{m}$,从传函图可以看出,在奈奎斯特频率为 80 lp/mm 时,系统 $\text{MTF} > 0.53$,成像质量良好,接近衍射极限;系统中红外波段点列图、调制传递函数图如图 3 所示。从点列图中可以看出,中红外弥散斑的均方值小于 $15 \mu\text{m}$,在一个像元尺寸(像元尺寸为 $25 \mu\text{m}$)内,满足系统与探测器匹配的要求,从传函图可以看出,在奈奎斯特频率为 20 lp/mm 时,系统 $\text{MTF} > 0.5$,接近衍射极限,成像质量良好;系统长红外波段点列图、调制传递函数图如图 4 所示。从点列图中可以看出,长红外弥散斑的均方值小于 $10 \mu\text{m}$,在一个像元尺寸(像元尺寸为 $25 \mu\text{m}$)内,满足系统与探测器匹配

的要求,从传函图可以看出,在奈奎斯特频率为 20 lp/mm 时,系统 MTF > 0.36,成像质量良好。

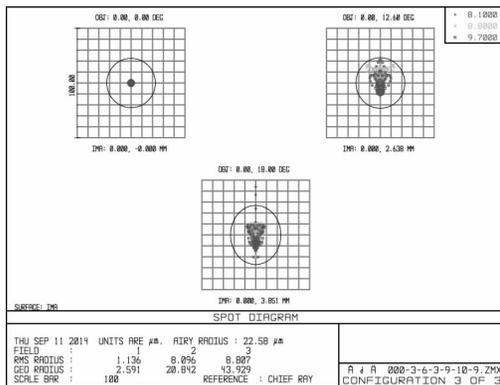


(a)点列图

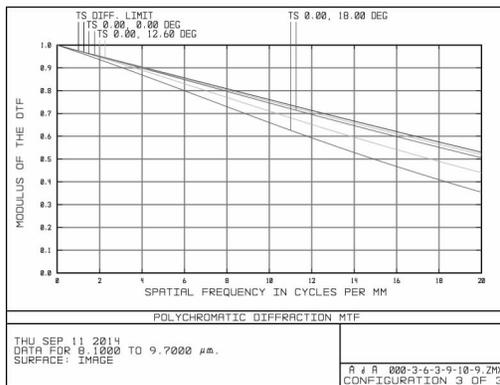


(b)传函图

图 3 中红外波段的点列图、传函图



(a)点列图



(b)传函图

图 4 长红外波段的点列图、传函图

4.3 能量分布

可见光波段的能量分布曲线如图 5 所示。全视场能量 85% 集中在探测器的一个面元内;中红外波段的能量分布曲线如图 6 所示。全视场能量 80% 集中在探测器的一个面元内;长红外波段的能量分布曲线如图 7 所示。全视场能量 80% 集中在探测器的一个面元内。

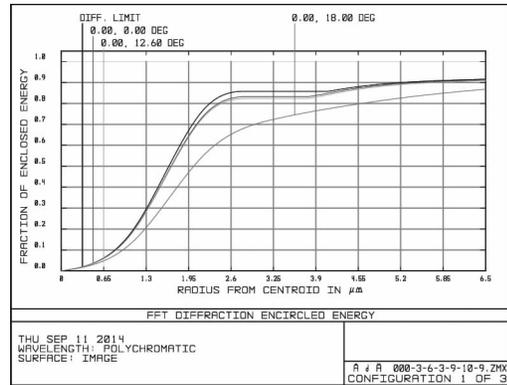


图 5 可见光波段能量分布

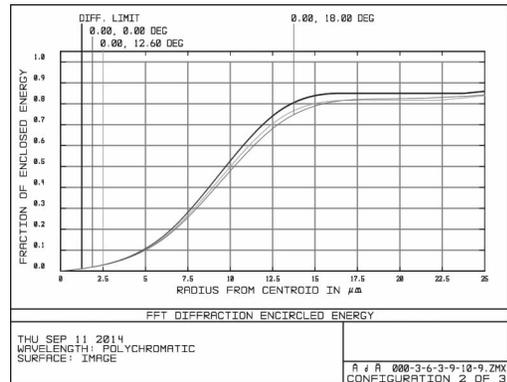


图 6 中红外波段能量分布

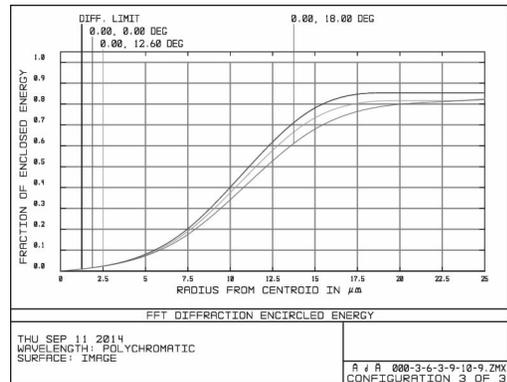


图 7 长红外波段能量分布

4.4 焦距补偿结果

表 3 给出了中波红外焦距补偿组的位移量,表 4 给出了中波红外焦距的补偿结果;表 5 给出了长波红外焦距补偿组的位移量,表 6 给出了长波红外焦距的补偿结果。

表3 中红外波段焦距补偿组位移量

d_1/mm	d_2/mm
-20.806463	-10.864355

表4 可见、中波补偿优化后焦距

	焦距/mm
可见光	12
中波	12.0046
焦距差	0.0046

表5 长红外波段焦距补偿组位移量

d_3/mm	d_4/mm
-13.576305	-18.094513

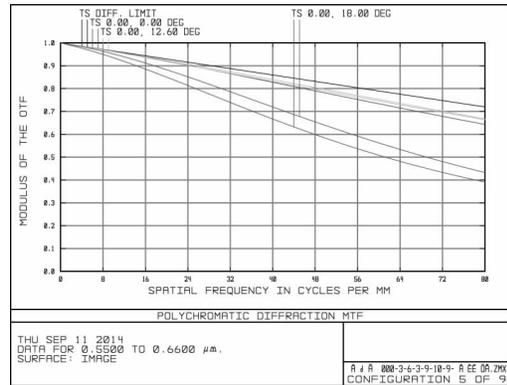
表6 可见、长波补偿优化后焦距

	焦距/mm
可见光	12
长波	12.0073
焦距差	0.0073

5 系统消热差

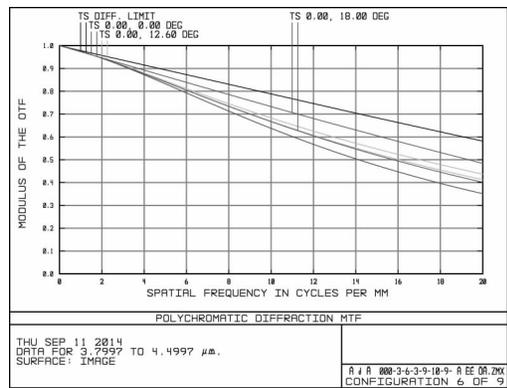
由于设计的共口径三波段光学系统在三个波段的光路上都使用了受温度影响较大的材料,因此可见光、中波和长波红外三个波段都需要考虑消热差,对系统在-40~60℃温度范围内进行消热差分析,分析三个波段的离焦量与温度的关系,合理选择补偿方式对系统消热差就可达到消除离焦量的目的。

经过分析,三个波段在不同温度条件下它们的离焦量不大,可以合理选择热差补偿镜并微调补偿镜位置消除其离焦量。可见光路选择像差矫正组第一片透镜作为一个热差补偿镜组进行补偿,中波和长波红外光路选择它们各自的焦距补偿组进行补偿,补偿后能达到良好的热差补偿效果。下面给出可见光、中红外和长红外在-40~60℃温度范围内的消热差结果,如图8、9、10所示。从图中可以看出,系统消热差后成像质量稍有下降,但总体能满足系统设计要

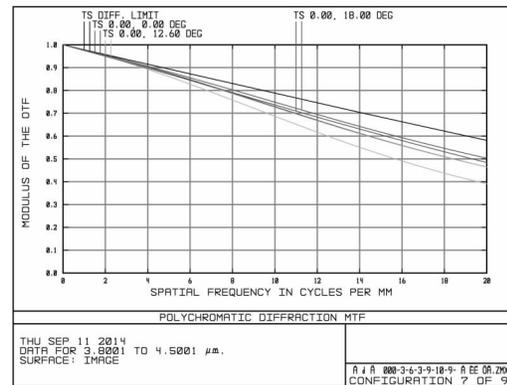


(b) 60℃

图8 可见光波段在-40℃和60℃时热差补偿后的传函图

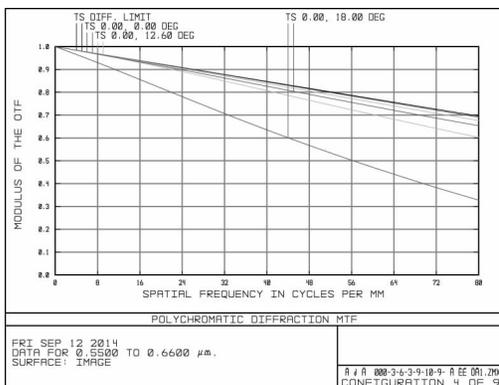


(a)-40℃

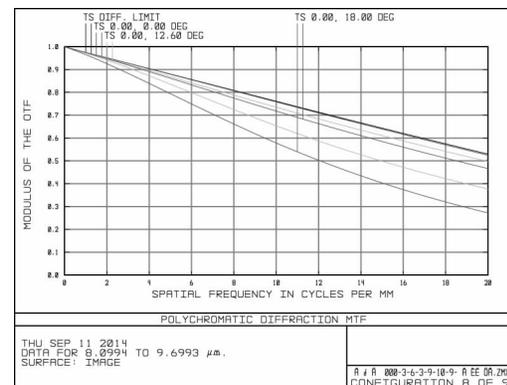


(b) 60℃

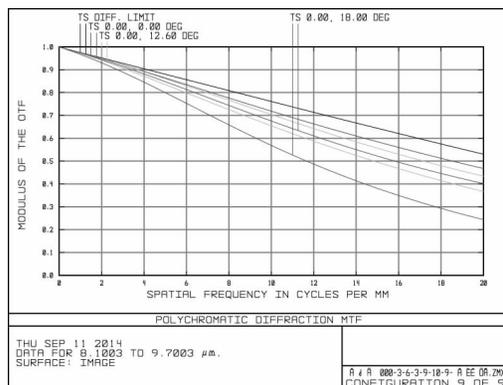
图9 中红外波段在-40℃和60℃时热差补偿后的传函图



(a)-40℃



(a)-40℃



(b) 60 °C

图10 长红外波段在-40 °C和60 °C时热差补偿后的传函图

6 结论

本文设计的可见光、中/长波三波段共口径、共焦距光学系统,三个波段共用一组光路,实现系统同时接收可见光、中/长波三个波段目标信息的目的,系统体积与单个系统相当,对实现系统的小型化、轻量化具有明显的优势;通过焦距补偿使得三个波段焦距相等,提高了三个波段目标信息的一致性。系统具有体积小、实时性高、反应速度快等优势。其中,可见光路总长为342.731 mm,奈奎斯特频率为80 lp/mm时传函值高于0.53,中波红外光路体积为228.925 mm × 89.5249 mm,在奈奎斯特频率为20 lp/mm时传函值高于0.5,长波红外光路体积为257.97 mm × 102.586 mm,奈奎斯特频率为20 lp/mm时传函值高于0.36,系统整体成像质量好,实现了系统在温度范围内(-40 ~ 60 °C)消热差。可以预见,在未来的侦查和观测领域,这种快速、实时、同步观测的系统将具有广阔的应用前景。

参考文献:

- [1] ZHANG Liang, MAO Xin, WANG Helong. The design of MWIR / LWIR multiple FOV optical system[J]. Infrared Millim. Waves, 2013, 32(3): 255 - 264. (in Chinese)
张良,毛鑫,王合龙. 中波/长波双色多视场光学系统设计[J]. 红外与毫米波学报, 2013, 32(3): 255 - 264.
- [2] Jay N. Vizgaitis. Optical concepts for dual band infrared continuous zoom lenses [J]. Proc. SPIE, 2010, 7652: 76522E.
- [3] LIU Feng, XUN Xiping, LI Xiangyang. 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.
- [4] ZHANG Xingde, LI Ronggang, LIU Bing, et al. Research and development of dual-band infrared camera system[J]. Laser & Infrared, 2010, 40(8): 801 - 804. (in Chinese)
张兴德,李荣刚,刘琳,等. 红外双波段成像系统的研究与发展[J]. 激光与红外, 2010, 40(8): 801 - 804.
- [5] ZHANG Chunyan, SHEN Weimin. Design of an athermalized MWIR and LWIR dual-band optical system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(5): 1323 - 1328. (in Chinese)
张春艳,沈为民. 中波和长波红外双波段消热差光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(5): 1323 - 1328.
- [6] Nicholas Allan, Thompson. Optical design of common aperture common focal plane, multispectral optics for military applications [J]. Optical Engineering, 2013, 52(6): 061308.
- [7] MA Hongtao, ZHANG Xiaohui, HAN Bing. Design of telescope system with a wide spectrum, large field and small distortion[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(7): 1755 - 1757. (in Chinese)
马洪涛,张晓辉,韩冰. 宽光谱、大视场小畸变望远镜系统设计[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(7): 1755 - 1757.
- [8] GUO Banghui, SUN Qiang, WANG Zhi. Design of 300 - 1100mm multi-band optical imaging system and its stray light analysis[J]. Chinese Journal of Optical and Applied Optics, 2010, 5(3): 475 - 479. (in Chinese)
郭帮辉,孙强,王志. 300 - 1100多波段成像光学系统设计及杂光分析[J]. 中国光学与应用光学, 2010, 5(3): 475 - 479.
- [9] MA Tao, SHEN Yibing, YANG Guoguang. Optical design of a triple-waveband hybrid system [J]. Optical Instruments, 2006, 28(6): 60 - 63. (in Chinese)
马韬,沈亦兵,杨国光. 一种反射/折射/衍射三波段混合成像系统设计[J]. 光学仪器, 2006, 28(6): 60 - 63.
- [10] CHANG Jun, LIU Liping, WANG Yangtian. Dual-band infrared optical system with large field-of-view and aperture [J]. J. infrared millim. wave. 2006, 25(3): 171 - 172. (in Chinese)
常军,刘莉萍,王涌天. 大视场、大口径双波段红外非制冷光学系统[J]. 红外与毫米波学报, 2006, 25(3): 171 - 172.
- [11] Allen Mann. Developments and trends in infrared zoom lenses from 2000 to 2010[J]. Optical Engineering, 2013, 52(1): 013001.
- [12] LI Jingnan. Unmanned aerial vehicle load multispectral camera design [J]. Ship electronic engineering, 2013, 33(4): 149 - 152. (in Chinese)
李江南. 无人机载多光谱相机设计[J]. 舰船电子工程, 2013, 33(4): 149 - 152.
- [13] TAO Chuncan. Zoom lens design [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1988: 38 - 41. (in Chinese)
陶纯堪. 变焦距光学系统设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 1988: 38 - 41.