

引用格式:王艺栋,李文强,孟庆斌.可见光/红外双波段共光路光学系统设计[J].电光与控制,2018,25(12):94-97. WANG Y D, LI W Q, MENG Q B. Design of a visible light/LWIR dual-band mutual path optical system[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(12):94-97.

## 可见光/红外双波段共光路光学系统设计

王艺栋<sup>1</sup>, 李文强<sup>2</sup>, 孟庆斌<sup>2</sup>

(1. 南京理工大学, 南京 210000; 2. 中国航空工业集团公司洛阳电光设备研究所, 河南 洛阳 471000)

**摘要:**针对传统的多波段分布孔径式光学系统体积大、不同波段目标存在差异等问题,选择了折射式光学系统,提出共用孔径、棱镜分光的光学设计方法,实现可见光与长波红外同时成像。设计了可见光、长波红外共光路的折射式光学系统,使用能够透射可见光、长波红外波段的材料实现光路完全共用一组透镜,光学系统采用光学被动式无热化设计。设计实例表明:在可见光工作波段 $0.55 \sim 0.75 \mu\text{m}$ ,长波红外工作波段 $7.5 \sim 9.5 \mu\text{m}$ ,两个波段焦距为120 mm, F数为2.8。可见光传递函数在空间频率90 lp/mm处在0.5以上,长波红外传递函数在空间频率17 lp/mm处在0.4以上,在 $-40 \sim +60^\circ\text{C}$ 工作温度范围内消热差。

**关键词:** 双波段; 光学设计; 可见光; 长波红外

中图分类号: TN215 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-637X.2018.12.020

## Design of a Visible Light/LWIR Dual-Band Mutual Path Optical System

WANG Yi-dong<sup>1</sup>, LI Wen-qiang<sup>2</sup>, MENG Qing-bin<sup>2</sup>

(1. Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210000, China;

2. Luoyang Institute of Electro-Optical Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China)

**Abstract:** To solve the problems of large volume and chromatic aberration in the distributed-aperture optical system working in multi-waveband environment, a refractive optical system is proposed as an alternative, in which the visible light and Long Wave Infrared(LWIR) share the mutual aperture and prism splitter. The mutual optical path of different wavebands is realized by utilizing certain kinds of materials that both visible light and LWIR can pass through. The optical system adopts the passive athermalization design. The design result suggests that, for the visible light working in the range of  $0.55 \sim 0.75 \mu\text{m}$  and LWIR working in the range of  $7.5 \sim 9.5 \mu\text{m}$ , their focal length is 120 mm and the F number is 2.8. The MTF for visible light is above 0.5 at a spatial frequency of 90 lp/mm, while the MTF for LWIR is above 0.4 at a spatial frequency of 17 lp/mm. Athermalization is realized in the temperature range of  $-40 \sim +60^\circ\text{C}$ .

**Key words:** dual-band; optical design; visible light; LWIR

### 0 引言

在军事和安防领域常使用可见光和红外波段混合探测实现全天候监视侦察,目标在不同观测波段系统下成像的特征信息不同,可见光的波长短、分辨率高,但是只能在光照充足的情况下使用,红外波段利用温差进行探测,能够昼夜进行观测,但是波长比可见光长,分辨率相比可见光低一些。通过多波段探测能够有效利用多波段获取的目标信息,对背景进行抑制,提

高目标的探测概率,降低虚警率<sup>[1-8]</sup>。

目前世界上先进的光电探测设备大多采用多波段集成的模式,早期的多波段观测常用的方式是各波段光路独立。随着设计水平的提高和加工工艺的发展,多波段共孔径成为光电系统发展的方向,文献[1]介绍了第三代光电探测设备发展的趋势,多波段通过共用望远系统实现高度集成化,进一步减小系统空间和体积;文献[2]设计了可见光、激光、红外共望远系统的光学系统;文献[3]设计了中波红外和长波红外共光路的光学系统;文献[4]设计了多波段共用反射式主次镜的光学构型。

本文采用折射式光学系统,选用可见光和长波红外作为两个观测波段,具有可见光分辨率高、长波红外

收稿日期:2018-09-29

修回日期:2018-11-13

作者简介:王艺栋(1998—)男,河北钟祥人,研究方向为光学和通信技术应用。

能够在夜间工作等特性。可见光与长波红外焦距相同,白天可以实现可见光红外实时成像,观测信息相同,有利于后期图像融合。将可见光与长波红外融合在一起,共用光路,大幅度减小了系统的体积,满足机载光电系统轻量化要求。通过选用 ZnS, ZnSe, CaF<sub>2</sub>, BaF<sub>2</sub> 宽波段材料,采用光学被动式无热化设计,实现了双波段在工作温度范围内成像质量良好。

## 1 设计过程和结果

### 1.1 系统的设计指标

长波红外光学系统采用 320 × 256 非制冷型长波红外探测器,像元大小 30 μm;可见光光学系统采用 1280 × 1024 面元探测器,像元尺寸 7.5 μm。系统的设计参数见表 1。

表 1 光学系统设计参数

Table 1 Design parameters of the optical system

参数	数值
焦距/mm	120
F 数	2.8
波段/μm	0.55 ~ 0.75; 7.5 ~ 9.5
视场/(°) × (°)	5.04 × 2.83
无热化温度范围/°C	-40 ~ +60

对系统的要求如下:可见光系统 MTF 在空间频率为 100 lp/mm 时,轴上的 MTF 大于 0.5,轴外的 MTF 大于 0.4,畸变值小于 2%;长波红外系统 MTF 在空间频率 17 lp/mm 处,轴上的 MTF 大于 0.4,轴外的 MTF 大于 0.35,畸变值小于 2%。在 -40 ~ +60 °C 温度范围内满足无热化。

其设计思路:为了满足双波段光学系统在两个波段内有较高的透过率,采用 5 片式一次成像结构。可见光、长波红外完全共用光路,探测器前通过分光器件实现双波段同时成像。系统的分光通常有棱镜分光 and 分光镜分光两种形式。分光镜分光由于加入一个倾斜的平板,会带来不对称的像差,难以校正,所以本文采用棱镜分光。光学系统设计通常采用折射率色散较小的材料作为正透镜,色散大的材料作为负光焦度材料来校正色差。由于双波段跨度范围较大, BaF<sub>2</sub> 在整个工作波段色散较小,可作为正透镜材料; ZnSe, ZnS, CaF<sub>2</sub> 色散较大,可作为负透镜材料,通过正负搭配校正像差和色差。系统设计时适当增加非球面,校正像差,减少镜片使用片数,增大系统的透过率,提高系统的作用距离。由于系统工作温度范围在 -40 ~ +60 °C,系统需要进行无热化设计。为了使系统具有性能稳定、体积小、可维护性好等优点,无热化设计采用光学被动式,实现双波段成像。

### 1.2 初始结构设计

根据镜片的数量,已知系统视场角的大小,在 Co-

deV 软件中选择一个初始结构。选择初始结构的原则是:根据目标,选择 F 数较小的、视场较大的初始结构。最终选择日本专利 811221 作为系统的初始结构,如图 1 所示。

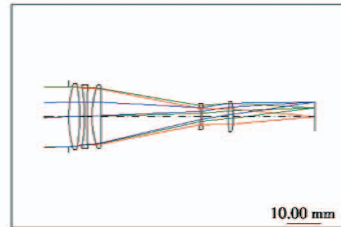


图 1 专利光路图

Fig. 1 Structure of the patent path

用 BaF<sub>2</sub> 替换镜头的正透镜,其他材料替换镜头的负透镜。通过缩放来满足系统的有效焦距。经过几次优化,实现在可见光条件下满足系统的要求,再通过在软件中添加两个波段,在不同波段下同时优化,满足双波段常温系统性能指标。图 2 为经过初始优化得到的双波段共光路的光路图。

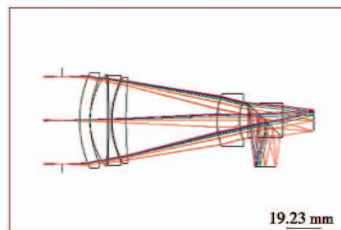


图 2 光学系统光路图

Fig. 2 Structure of the optical system

### 1.3 消热差设计

光学系统在 -40 ~ +60 °C 温度范围内工作,如此大的温度变化会导致系统内部光学镜片的厚度、间隔、曲率半径以及光学材料的折射率发生改变。这些结构参数的改变会导致光学系统的焦点随温度变化漂移,影响成像性能。

为了使系统的环境适应性更好,结构更简洁,本文采用光学被动式无热化设计方法,通过利用光学材料不同的热差和色差特性,合理分配光焦度与元件间隔,使系统在不同温度范围内工作性能良好。

空气中由  $j$  个薄透镜组成的系统采用光学被动式无热化设计,应该满足

$$\begin{cases} \phi = \frac{1}{f} = \frac{1}{h_1} \sum_{i=1}^k h_i \phi_i \\ \omega = \frac{1}{h_1^2 \phi} \sum_{i=1}^k h_i^2 \omega_i \phi_i = 0 \\ \theta = \frac{1}{h_1^2 \phi} \sum_{i=1}^k h_i^2 \theta_i \phi_i = -\alpha \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $h_i$  为近轴边缘光线在第  $i$  个透镜上的入射高度;



$\omega$  和  $\theta$  分别为色散系数和消热差系数;  $\alpha$  为镜筒结构件的热膨胀系数。

根据薄透镜无热化方程可知,光学被动无热化需要满足光焦度的合理分配,材料的色散系数和镜筒的热膨胀系数要匹配。在常温结构的基础上,在软件中设置不同的温度,添加优化约束条件,如镜筒的热膨胀系数,使用 CodeV 软件中替换材料功能,实现系统的无热化设计。

## 2 设计实例

### 2.1 优化设计

在初始结构的基础上,对系统进行无热化设计。系统的结构材料为铝,热膨胀系数为  $23.6 \times 10^{-6}$ 。在软件中经过多次优化,完成了光学材料顺序重新组合,光焦重新分配,系统满足在  $-40 \sim +60\text{ }^\circ\text{C}$  温度范围内的消热差设计。最终确定系统的材料顺序为  $\text{BaF}_2, \text{BaF}_2, \text{CaF}_2, \text{ZnS}, \text{ZnSe}$ , 光焦度顺序为负负正正正。

无热化后的系统结构如图 3 所示。

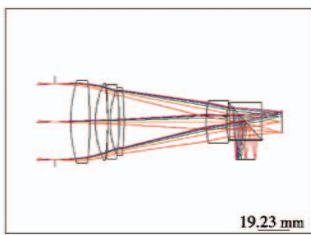


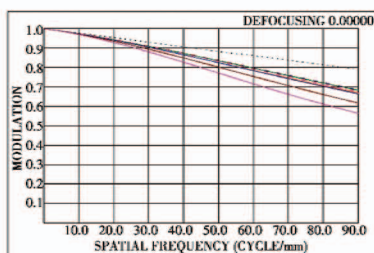
图 3 光学系统无热化设计结果

Fig. 3 Optical system after athermalization design

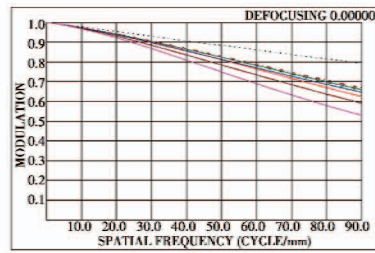
在设计过程中引入 3 个非球面,分别在第 1 元件前表面、第 4 元件前表面、第 5 元件后表面上,平衡系统像差,提高了系统透过率。

### 2.2 设计结果

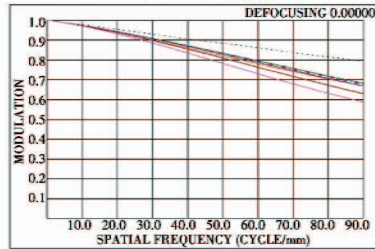
对于不同波段的光学传递函数,截止频率不同,通常系统设计时要求光学截止频率高于探测器截止频率。双波段共孔径光学系统在不同温度下的传递函数如图 4 所示。在全工作温度范围内 ( $-40 \sim +60\text{ }^\circ\text{C}$ ), 可见光各个视场的 MTF 在  $90\text{ lp/mm}$  处的光学传递函数大于 0.5, 长波红外各个视场的 MTF 在  $17\text{ lp/mm}$  处的光学传递函数大于 0.4, 满足系统的性能要求。两个波段的光学传递函数都满足设计指标。



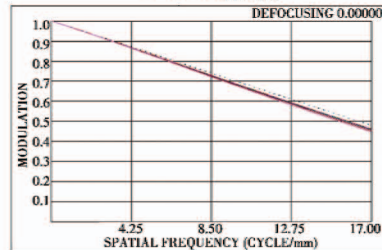
a 20 °C 可见光



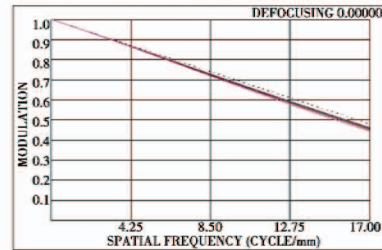
b -40 °C 可见光



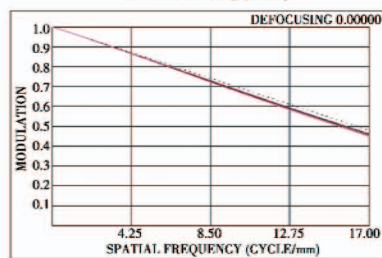
c 60 °C 可见光



d 20 °C 长波红外



e -40 °C 长波红外



f 60 °C 长波红外

图 4 系统 MTF 曲线

Fig. 4 Curve of modulation transfer function of the system

畸变会影响成像的视觉效果,光学设计时需要把畸变控制在合理的范围内。图 5、图 6 分别为两个波段的畸变网格图,全视场范围内畸变均小于 1%, 满足使用要求。

光束通过光学成像系统会聚成一个弥散斑,通常要求弥散斑的均方根直径小于探测器单个像元才不会导致图像模糊。图 7 为可见光点列图,所有视场成像光斑均方根直径小于 CCD 面元尺寸  $7.5\text{ }\mu\text{m}$ 。图 8 为长波红外点列图,成像光斑均方根直径小于红外探测器面元尺寸  $30\text{ }\mu\text{m}$ , 满足使用要求。

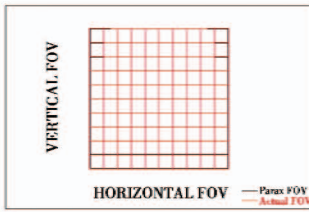


图 5 可见光畸变图

Fig. 5 Distortion grid of visible light

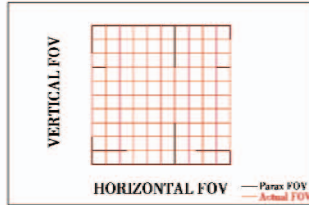


图 6 长波红外畸变图

Fig. 6 Distortion grid of LWIR

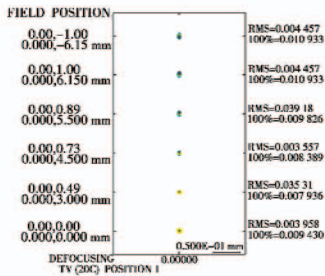


图 7 可见光点列图

Fig. 7 Spot diagram of visible light

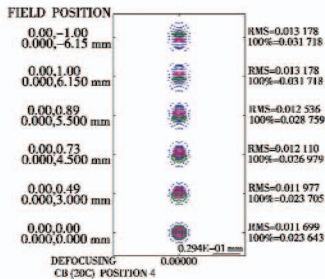


图 8 长波红外点列图

Fig. 8 Spot diagram of LWIR

### 3 结论

多波段共光路系统在光学成像领域有着重要用途,通过共光路能够有效减小整个系统的空间和体积。采用 5 片透镜,设计了一个可见光、长波红外共光路的光学系统,工作波段分别为 0.55 ~ 0.75  $\mu\text{m}$ , 7.5 ~ 9.5  $\mu\text{m}$ ,在 -40 ~ +60  $^{\circ}\text{C}$  温度范围内,双波段成像质量良好,结构紧凑。通过引入非球面减少了系统的元件使用数量,提高了系统透过率,该系统在轻量化、小型化、无热化方面都有很大优势,该设计既可以用在航空多波段光电侦察探测领域,又可以应用在民用安防领域。

### 参考文献

- [1] VIZGAITIS J. Third generation infrared optics[C]//Proceedings of SPIE, 2008:1-10.
- [2] 焦明印,李元,肖相国.一种紧凑离轴反射式多波段共用光学系统[J].红外技术,2014,36(12):949-952.
- [3] 王海涛,耿安兵.一体化红外双波段成像光学系统[J].红外与激光工程,2008,37(3):489-492.
- [4] 张祥翔,傅雨田.多波段空间推扫相机光学系统设计[J].应用光学,2007,28(4):412-415.
- [5] 杨利华,樊学武,邹刚毅.宽谱段大口径透射式摄影镜头设计[J].应用光学,2009,30(6):925-928.
- [6] 吴海清,王海霞,赵新亮,等.双波段/双视场红外光学系统设计[J].红外技术,2010,32(11):640-644.
- [7] 史广维,张新,张建萍.无遮拦折反射红外光学系统[J].光学精密工程,2014,22(8):1995-2000.
- [8] 王恒坤,王兵,庄昕宇,等.多波段高功率激光扩束系统设计[J].强激光与粒子束,2011,23(7):1785-1788.

(上接第 93 页)

- [4] ROARK C. SAE AS4893 Generic Open Architecture (GOA) framework [C]//The 15th DASC AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference, 1996:217-222.
- [5] AS-1B Aircraft Store Integration Committee. SAE AIR5532 generic aircraft-store interface framework (GASIF) [S]. New York:SAE International, 2003.
- [6] U. S. Department of Defense. MIL-STD-3014 mission data

exchange format[S]. U. S.:[s. n.], 2005.

- [7] 刘桂雄.基于 IEEE1451 的智能传感器技术与应用[M].北京:清华大学出版社,2012.
- [8] 王占中.XML 技术教程[M].成都:西南财经大学出版社,2011.
- [9] 祖兆研.基于插件技术的软件架构设计及应用[D].南京:河海大学,2007.