

折/衍射双波段共光路齐焦光学系统设计

高明,许黄蓉,刘钧,吕宏,陈阳

(西安工业大学 光电工程学院 光电信息技术研究所,陕西 西安 710021)

摘要: 为了提高双波段光学系统成像性能,结合可见光和中波红外的特点,设计了无光路补偿的折/衍射双波段共光路齐焦光学系统。对系统的 4 片透镜波段间消色差以及焦距补偿表达式进行了推导,采用 4 片透镜并引入二元衍射面,通过合理匹配光学系统光焦度,实现了系统共用一组光路,在可见光和中波红外两个波段的焦距一致,提高了双波段观测目标信息的一致性。设计的双波段共口径/共光路成像光学系统的工作波长为 $0.38\sim 0.76\ \mu\text{m}$, $3\sim 5\ \mu\text{m}$,系统的焦距为 90 mm,视场角为 0.5° , F 数为 3,在 $-40\sim +60\ ^\circ\text{C}$ 的温度范围内采用光学被动式进行消热差设计。设计结果表明:系统结构简单,体积小,成像质量接近衍射极限。

关键词: 双波段; 共口径/共光路; 齐焦设计; 消热差

中图分类号: TN214 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0518003

Design of diffractive-refractive dual-band co-path parfocal optical system

Gao Ming, Xu Huangrong, Liu Jun, Lv Hong, Chen Yang

(Institute of Optical Information Technology, School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China)

Abstract: In order to improve the imaging performance of dual-band optical system, considering the characteristics of visible light and MWIR, diffractive-refractive dual-band co-path and parfocal without compensation optical path optical system was designed. The four lens achromatic and focal length compensation expression between wave band were derived. The system used four lenses and introduces binary diffraction surface by properly matching the optical system power to achieve common optical path. The focal lengths were consistent between the visible and infrared, which improves consistency of dual-band target information. The optical system operating wavelength is $0.38\sim 0.76\ \mu\text{m}$ and $3\sim 5\ \mu\text{m}$, the focal length of the whole optical system is 90 mm, the field of view is 0.5° and the F number is 3, respectively. The dual-band athermal optical system with the temperature of $-40\sim +60\ ^\circ\text{C}$ was designed with the use of optical passive. The results show that the designed system structure is simple and the size is small, has an excellent in overall image quality.

Key words: dual-band; co-caliber/co-path; parfocal design; athermalization

收稿日期:2016-09-05; 修订日期:2016-10-10

基金项目:陕西省教育厅重点实验室科学研究计划(14JS034)

作者简介:高明(1964-),男,教授,博士,主要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方面的研究。

Email:minggao1990@sohu.com

通讯作者:许黄蓉(1991-),女,硕士生,主要从事光学设计理论及技术方面的研究。Email:530959839@qq.com

0 引言

随着快速发展的社会需求以及使用环境的日趋复杂,对双波段乃至多波段成像光学系统的性能提出了越来越高的要求。与单波段光学系统相比,双波段光学系统具有更多的观测通道有利于更快发现目标,此外将可见光和中波红外两个波段融合在同一个通道中,获得的目标信息更全面、更精准,抗干扰能力强,探测准确度高,而在双波段齐焦设计的过程中不加入补偿光路,使得系统体积更小。基于以上优点,双波段、多波段共口径/共光路光学系统及其相关的融合成像技术成为光学领域重要的研究课题^[1-3]。由于光学材料对于不同波段不同波长表现出不同特性,故双波段成像系统需要综合校正各波段内与全波段范围的色差与单色像差。现有的可见光、红外双波段光学系统大多由两个单独系统组成,系统体积大,侦查设备整体复杂^[4]。刘钧等人^[5]设计了可见光/红外双波段大视场共口径齐焦光学系统,采用折射式实现两个波段共口径成像,系统的公共部分使用了 3 片透镜,可见光补偿组使用了 4 片透镜。李岩等人^[6]设计了谐衍射红外双波段双视场光学系统,该系统使用 5 片透镜在双波段实现两档变焦,但系统的工作波段为中波红外和长波红外两个波段,不能辨别目标信息的细节。李西杰等人^[7]设计了双波段大变倍比连续共变焦光学系统,将可见光路和红外光路融合在一个通道里,通过一组镜头实现可见、红外两路光同时透过,但是系统在可见光光路和红外光光路分别加上焦距补偿组用以校正可见光、中红外的剩余像差,使得系统体积变大。

设计了一种双波段共口径/共光路成像光学系统,在不采用补偿光路的情况下使得系统在双波段处焦距一致。结合波段间消色差和波段间焦距补偿表达式,双波段共口径/共光路成像系统选用 BaF₂/ZnS/CaF₂/MgF₂ 材料,进行光焦度合理匹配,使系统在不同波段焦距相等。该系统在不同波段观测目标时,不需要进行光路转换,保证了系统结构简单,体积小,而且能够提高不同波段获取目标信息的一致性。

1 理论推导

1.1 双波段齐焦理论

在成像光学系统中,要以共口径/共光路的形式

实现双波段焦距一致的要求,也就是需要满足系统在不同波段处的光焦度相等。文中采用薄透镜理论对所涉及的模型进行描述,双光组组合如图 1 所示,图中 d 为透镜 1、2 的间距。

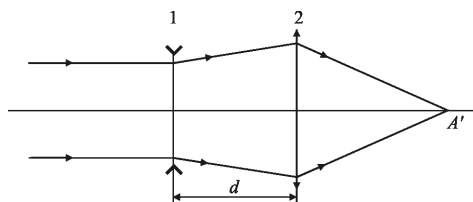


图 1 双光组组合

Fig.1 Bifocal combinations

据此可推导出双波段光学系统中两波段光焦度相等的条件,如公式(1)所示:

$$\Delta\Phi_1 + \Delta\Phi_2 - d(\Phi_1\Delta\Phi_2 + \Phi_2\Delta\Phi_1 - \Delta\Phi_1\Delta\Phi_2) = 0 \quad (1)$$

式中: Φ_1 、 Φ_2 分别为透镜 1、2 的光焦度; $\Delta\Phi_1$ 、 $\Delta\Phi_2$ 分别为两个不同波段中心波长通过透镜 1、2 的光焦度差值。此处,

$$\begin{cases} \frac{1}{\Phi_i} = \frac{n_i r_{2i-1} r_{2i}}{(n_i - 1)[n_i(r_{2i} - r_{2i-1}) + (n_i - 1)d_i]} \\ \Delta\Phi_i = \frac{\Delta n_i(r_{2i} - r_{2i-1} + d_i)}{r_{2i-1} r_{2i}} - \frac{\Delta n_i d_i}{n_i(n_i + \Delta n_i)r_{2i-1} r_{2i}} \end{cases} \quad (i=1, 2) \quad (2)$$

式中: r_{2i} 、 r_{2i-1} 分别为透镜两个面的半径; d_i 为透镜的中心厚度; n_i 为某波长处透镜的折射率; Δn_i 为两个波长透过该材料时折射率的差值。

当为多光组组合时,不同波长通过光学系统时的总光焦度为:

$$\begin{cases} \Phi = \Phi_1 + \frac{h_2}{h_1} \Phi_2 + \dots + \frac{h_k}{h_1} \Phi_k = \frac{1}{h_1} \sum_{i=1}^k h_i \Phi_i \\ \Phi' = \Phi_1' + \frac{h_2'}{h_1'} \Phi_2' + \dots + \frac{h_k'}{h_1'} \Phi_k' = \frac{1}{h_1'} \sum_{i=1}^k h_i' \Phi_i' \end{cases} \quad (3)$$

式中: Φ 、 Φ' 分别为两个不同波段处的中心波长通过系统时的总光焦度; h_i 为光线在第 i 个透镜上的入射高度,实际光学系统中近似认为 $h_i = h_i'$ 。则不同波段间的光焦度差值为:

$$\Delta\Phi = \Phi - \Phi' = \frac{1}{h_1} \sum_{i=1}^k h_i \Delta\Phi_i \quad (4)$$

如果将两个不同波段在光学设计中做到共口径/共光路且焦距一致,则需要满足下式:

$$\Delta\Phi_i = \sum_{i=1,2} \frac{\Delta n_i(r_{2i} - r_{2i-1} + d_i)}{r_{2i-1} r_{2i}} - \frac{\Delta n_i d_i}{n_i(n_i + \Delta n_i)r_{2i-1} r_{2i}} = 0 \quad (i=1, 2) \quad (5)$$

将公式(5)代入公式(4)中可得:

$$\Delta\Phi = \frac{1}{h_1} \sum_{i=1}^k h_i \Delta\Phi_i = \frac{1}{h_1} \sum_{i=1,2} h_i \left[\frac{\Delta n_i (r_{2i} - r_{2i-1} + d_i)}{r_{2i-1} r_{2i}} - \frac{\Delta n_i d_i}{n_i (n_i + \Delta n_i) r_{2i-1} r_{2i}} \right] = 0 \quad (i=1, 2) \quad (6)$$

1.2 双波段消色差理论

同一种材料在不同的波段, 其色散能力是不一样的。光学系统在波段内会存在自身色差, 并且在波段间会存在更为明显的色差, 由于不同波段范围跨度比较大, 因此影响更为显著, 那么对波段间色差的研究和校正显得尤为重要^[8-9]。当材料选定时, $n_i, \Delta n_i$ 为定值, 不同波段透过同一个光学系统时, 要满足焦距相等, 则可得出对应两个透镜的半径及中心厚度的关系, 再结合像差校正进一步求得其数值。

两个波段间的色差如公式(7)表示:

$$\Delta l' = l_{\lambda_1}' - l_{\lambda_2}' \quad (7)$$

式中: $l_{\lambda_1}', l_{\lambda_2}'$ 分别表示两个波段的中心波长通过光学系统时的像距。

由高斯公式

$$\begin{cases} \frac{1}{l_{i\lambda_1}'} - \frac{1}{l_{i\lambda_1}} = \Phi_i \\ \frac{1}{l_{i\lambda_2}'} - \frac{1}{l_{i\lambda_2}} = \Phi_i' \end{cases} \Rightarrow \frac{l_{i\lambda_1}' - l_{i\lambda_2}'}{l_{i\lambda_1}' l_{i\lambda_2}'} - \frac{l_{i\lambda_1} - l_{i\lambda_2}}{l_{i\lambda_1} l_{i\lambda_2}} = \Phi_i - \Phi_i' \quad (8)$$

式中: $l_{i\lambda_1}, l_{i\lambda_2}, l_{i\lambda_1}', l_{i\lambda_2}'$ 分别表示两个波长通过第 i 片透镜时所对应的物距和像距。

由几何光学知识可知:

$$lu = l' u' = h \quad (9)$$

将公式(9)带入公式(8)可得:

$$(l_{i\lambda_1}' - l_{i\lambda_2}') = u_{i\lambda_1}' u_{i\lambda_2}' - (l_{i\lambda_2} - l_{i\lambda_1}) u_{i\lambda_1} u_{i\lambda_2} = (\Phi_i' - \Phi_i) h_{i\lambda_1} h_{i\lambda_2} \quad (10)$$

对含有 k 个光学元件的光学系统来说, 则有:

$$\begin{cases} (l_{1\lambda_1}' - l_{1\lambda_2}') u_{1\lambda_1}' u_{1\lambda_2}' - (l_{1\lambda_2} - l_{1\lambda_1}) u_{1\lambda_1} u_{1\lambda_2} = (\Phi_1' - \Phi_1) h_{1\lambda_1} h_{1\lambda_2} \\ (l_{2\lambda_1}' - l_{2\lambda_2}') u_{2\lambda_1}' u_{2\lambda_2}' - (l_{2\lambda_2} - l_{2\lambda_1}) u_{2\lambda_1} u_{2\lambda_2} = (\Phi_2' - \Phi_2) h_{2\lambda_1} h_{2\lambda_2} \\ \vdots \\ (l_{k\lambda_1}' - l_{k\lambda_2}') u_{k\lambda_1}' u_{k\lambda_2}' - (l_{k\lambda_2} - l_{k\lambda_1}) u_{k\lambda_1} u_{k\lambda_2} = (\Phi_k' - \Phi_k) h_{k\lambda_1} h_{k\lambda_2} \end{cases} \quad (11)$$

将公式(11)中各式逐个相加, 并且结合转面公式:

$$\begin{cases} l_{i\lambda_1}' - l_{i\lambda_2}' = l_{(i+1)\lambda_1} - l_{(i+1)\lambda_2} \\ u_{i\lambda_1}' u_{i\lambda_2}' = u_{(i+1)\lambda_1} u_{(i+1)\lambda_2} \end{cases} \quad (12)$$

有

$$(l_{k\lambda_1}' - l_{k\lambda_2}') u_{k\lambda_1}' u_{k\lambda_2}' - (l_{1\lambda_2} - l_{1\lambda_1}) u_{1\lambda_1} u_{1\lambda_2} = \sum_{i=1}^k \Delta\Phi_i h_{i\lambda_1} h_{i\lambda_2} \quad (13)$$

考虑到 $u_{1\lambda_1} \approx u_{1\lambda_2} = u_1, u_{k\lambda_1}' \approx u_{k\lambda_2}' = u_k', h_{i\lambda_1} \approx h_{i\lambda_2} = h_i$, 公式(13)左边做一阶近似, 得到:

$$(l_{k\lambda_1}' - l_{k\lambda_2}') u_k'^2 - (l_{1\lambda_2} - l_{1\lambda_1}) u_1^2 = \sum_{i=1}^k h_i^2 \Delta\Phi_i \quad (14)$$

若物面位于无穷远时, $u_1 = 0$, 则:

$$(l_{k\lambda_1}' - l_{k\lambda_2}') u_k'^2 = \sum_{i=1}^k h_i^2 \Delta\Phi_i \quad (15)$$

故波段间的色差公式为:

$$l_{k\lambda_1}' - l_{k\lambda_2}' = \frac{1}{(h' \Phi)^2} \sum_{i=1}^k h_i^2 \Delta\Phi_i \quad (16)$$

令公式(16)为零, 满足成像系统共口径/共光路的要求, 并且焦距做到一致, 满足观察目标的同时性、准确性, 即:

$$\frac{1}{(h' \Phi)^2} \sum_{i=1}^k h_i^2 \left(\frac{\Delta n_i (r_{2i} - r_{2i-1} + d_i)}{r_{2i-1} r_{2i}} - \frac{\Delta n_i d_i}{n_i (n_i + \Delta n_i) r_{2i-1} r_{2i}} \right) = 0 \quad (17)$$

光学系统是否消色差, 取决于初级位置色差系数 $\sum C_i$ 是否为零。对于双光组组合来说, 满足消色差的条件为:

$$\begin{cases} \Phi_1 + \frac{h_2}{h_1} \Phi_2 = \Phi \\ \frac{\Phi_1}{v_1} + \frac{\Phi_2}{v_2} = 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中: Φ_1, Φ_2 分别为两片透镜在中心波长处的光焦度; v_1, v_2 分别为所选两片透镜材料的阿贝数。

为了满足光焦度分配, 进一步消波段间色差, 采用 4 片不同材料的光学元件, 4 片薄透镜的消色差公式可以使系统在双波段下的光焦度相等, 从而达到共口径/共光路的要求。将在可见光中心波长 λ_1 、中波红外中心波长 λ_2 、可见光最短波长 λ_3 和中波红外最长波长 λ_4 处系统的总光焦度设为相等, 各波长处的轴向色差应等于零, 那么光焦度分配计算方程为:

$$\begin{cases} \Phi_1(\lambda_1) + \frac{h_2}{h_1} \Phi_2(\lambda_1) + \frac{h_3}{h_1} \Phi_3(\lambda_1) + \frac{h_4}{h_1} \Phi_4(\lambda_1) = \Phi \\ \frac{\Phi_1(\lambda_1)}{v_1(\lambda_1)} + \frac{\Phi_2(\lambda_1)}{v_2(\lambda_1)} + \frac{\Phi_3(\lambda_1)}{v_3(\lambda_1)} + \frac{\Phi_4(\lambda_1)}{v_4(\lambda_1)} = 0 \\ \frac{\Phi_1(\lambda_2)}{v_1(\lambda_2)} + \frac{\Phi_2(\lambda_2)}{v_2(\lambda_2)} + \frac{\Phi_3(\lambda_2)}{v_3(\lambda_2)} + \frac{\Phi_4(\lambda_2)}{v_4(\lambda_2)} = 0 \\ \frac{\Phi_1(\lambda_3)}{v_1(\lambda_3)} + \frac{\Phi_2(\lambda_3)}{v_2(\lambda_3)} + \frac{\Phi_3(\lambda_3)}{v_3(\lambda_3)} + \frac{\Phi_4(\lambda_3)}{v_4(\lambda_3)} = 0 \\ \frac{\Phi_1(\lambda_4)}{v_1(\lambda_4)} + \frac{\Phi_2(\lambda_4)}{v_2(\lambda_4)} + \frac{\Phi_3(\lambda_4)}{v_3(\lambda_4)} + \frac{\Phi_4(\lambda_4)}{v_4(\lambda_4)} = 0 \end{cases} \quad (19)$$

式中： h_1, h_2, h_3, h_4 分别是光线在 4 片透镜上的入射高度； $\Phi_1(\lambda_1), \Phi_2(\lambda_1), \Phi_3(\lambda_1), \Phi_4(\lambda_1)$ 分别是在波长 λ_1 处 4 片透镜的光焦度； $v_1(\lambda_1), v_2(\lambda_1), v_3(\lambda_1), v_4(\lambda_1)$ 分别是在波长 λ_1 处 4 片透镜的阿贝数。

$$v_i(\lambda_i) = \frac{n_i(\lambda_i) - 1}{n_i(\lambda_1) - n_i(\lambda_2)} \quad (20)$$

由于折射率也是波长的函数，将公式(20)中折射面的光焦度代入公式(19)中，通过以上理论可计算出在波长 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4$ 处系统光焦度相等时，分别计算出所对应 4 片透镜的光焦度。要想在双波段内同时成像，同时校正像差，由于光学系统的光焦度、面型结构、中心厚度等结构参数已经确定，所以在选取材料时，需要控制元件表面光线的入射高度，正光焦度元件使用波段间阿贝数较大的材料，负光焦度元件采用波段间阿贝数较小的材料等。只有两种不同玻璃($v_1 \neq v_2$)进行组合时才有可能消色差，该系统采用正负、负正光焦度组合与衍射面相结合的结构，使得系统在可见光和中红外光两个波段的光焦度相等，并且该系统具有共口径/共光路的特点。

通过以上的理论分析，推导了两个波段间由于色散特性差异导致的波段间色差公式和双波段焦距补偿表达式，对此设计了折/衍射双波段共光路齐焦光学系统，并对其成像质量进行分析，用以理论验证。

2 系统设计

2.1 设计指标

折射/衍射双波段光学系统的焦距 $f' = -90 \text{ mm}$ ，视场角 $2\omega = 0.5^\circ$ ， $F^\# = 3$ ，系统探测距离不小于 5 km。光学系统分辨率和探测器分辨率的匹配性能是直接影响成像质量的因素之一。由于目前所使用的探测器中，可见光和中波红外波段还不能融合在一起，因此要保证成像的高清晰度和系统的高灵敏性，两个波段需要用不同的探测器。目前使用的红外探测器主要有制冷型和非制冷型两种。与制冷红外探测器相比，非制冷红外探测器不需要在系统中安装制冷和机械扫描装置，并且光阑位置没有限制，因此尺寸小，重量轻且功耗较低。故可见光波段选取 1/2" CCD，中红外波段选取非制冷焦平面阵列，所选用探测器的技术参数如表 1 所示。

表 1 探测器的技术参数

Tab.1 Technical parameters of the detector

Visible		MWIR	
Wave/ μm	0.38-0.76	Wave/ μm	3-5
Detector type	CCD	Detector type	UFPA
Image surface size	1/2(")	Image surface size	1/2(")
Pixel	752×582	Pixel	256×256
Pixel size/ μm	8.6×8.3	Pixel size/ μm	25×25

在不考虑内部因素对分辨率影响的前提下，对于可见光波段，CCD 的奈奎斯特频率 N_n 为：

$$N_n = \frac{1}{2\phi} = \frac{1}{2 \times 8.3 \times 10^{-3} \text{ mm}} = 60.24 \text{ lp/mm} \quad (21)$$

对于红外波段，探测器的奈奎斯特频率 N_n 为：

$$N_n = \frac{1}{2\phi} = \frac{1}{2 \times 25 \times 10^{-3} \text{ mm}} = 20 \text{ lp/mm} \quad (22)$$

式中： ϕ 为探测器的像元大小。取 61 lp/mm 作为评价可见光波段系统光学传递函数的最大参考空间频率值，取 20 lp/mm 作为评价中红外波段系统光学传递函数的最大参考空间频率值。

2.2 初始结构设计

根据双波段焦距补偿表达式和消色差理论，确定光学系统的材料和光焦度 Φ 分配，如表 2 所示。

表 2 光焦度分配

Tab.2 Distribution of optical power

Material	BaF ₂	ZnS	CaF ₂	MgF ₂
Φ	0.012 3	-0.002 8	-0.008 5	0.011 4

由轴上边缘光线和轴外主光线在各个透镜上的追迹量，给出光学系统结构参数，图 2 为光学系统

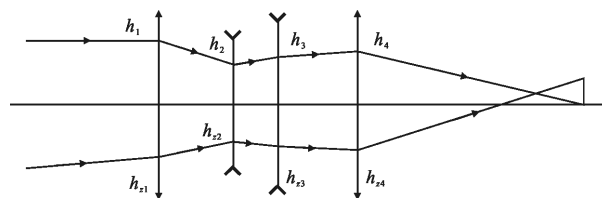


图 2 光学系统结构示意图

Fig.2 Diagram of optical system structure

结构示意图。设 h_i 和 h_{2i} 分别表示轴上边缘光线和轴外主光线在各透镜组上的入射高度； u_i 和 u_{2i} 分别为

为轴上边缘光线和轴外主光线在各透镜组上的物方孔径角; d_i 为第*i*个透镜与第*i+1*个透镜之间的间隔。光学系统的相对孔径为 1/3,焦距为 90 mm,求出第一个透镜的入射高度 h_1 为 15 mm,像面与所选探测器进行匹配,可求出像高为 8 mm。各个透镜的光焦度已由表 1 给出,则可由公式(23)^[10]追迹两条近轴光线。根据初级像差理论求解出满足成像质量要求的初始结构参数如表 3 所示。

$$\begin{cases} h_{i+1}=h_i-d_i u_{i+1} \\ u_{i+1}=u_i+h_i \varphi_i \\ h_{j+1}=h_j+d_j u_{j+1} \\ u_j=u_{j+1}-h_j \varphi_j \end{cases} \quad (23)$$

表 3 初始结构参数(单位:mm)

Tab.3 Initial structural parameters (Unit:mm)

Surface	Radius	Thickness
1	38.681	4.345
2	-63.822	3.942
3	-1 152.619	5.318
4	84.994	4.076
5	-121.552	4.763
6	67.825	6.457
7	66.757	2.497
8	-82.757	47.526

3 光学设计结果与分析

3.1 设计结果

综合考虑材料特性和设计要求,该系统选用可同时透过可见光和中波红外光的 BaF₂/ZnS/CaF₂/MgF₂ 材料,使用 4 片透镜,通过消轴向色差确定该透镜组的光焦度。系统在第二面引入衍射面,其中衍射级次:1 级;位相系数:C1=-12.783、C2=1.295。利用正负组合与衍射面相结合的结构校正球差、彗差和轴向色差。而场曲和垂轴色差则需要综合考虑材料组合、光焦度合理分配和正负透镜之间的间距,分离的两组透镜有利于轴外像差的校正。该光学系统实现了共口径/共光路,并且在分光之后并没有加入补偿光路,使其在可见光和中波红外波段焦距相等为 90 mm,可见光系统体积为 81.7 mm×26.9 mm,中波红外系统体积为 81.7 mm×27.5 mm。双波段成像系统由于没有光路补偿,使用透镜数量较少,使得系统体积减小,重量减轻,又由于双波段焦距一致,提

高了观测信息的一致性,工作波段为可见光和中红外波段,实现了全天候侦查。应用 Zemax 光学设计软件对光学系统进行设计和优化,得到系统结构如图 3 所示。

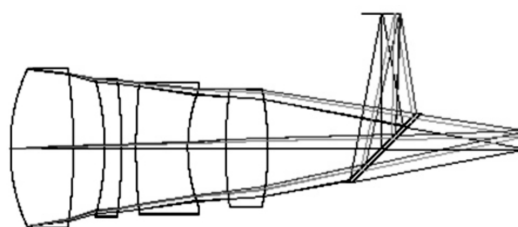


图 3 光学系统结构图

Fig.3 Layout of optical system

3.2 像质评价

图 4 为整体系统的点列图,图(a)可以看出可见光波段弥散斑的均方根值均小于 8.3 μm,图(b)中红外波段弥散斑的均方根值最大为 12 μm,在一个像元尺寸(像元尺寸为 25 μm)内,满足了系统与探测器的匹配要求。

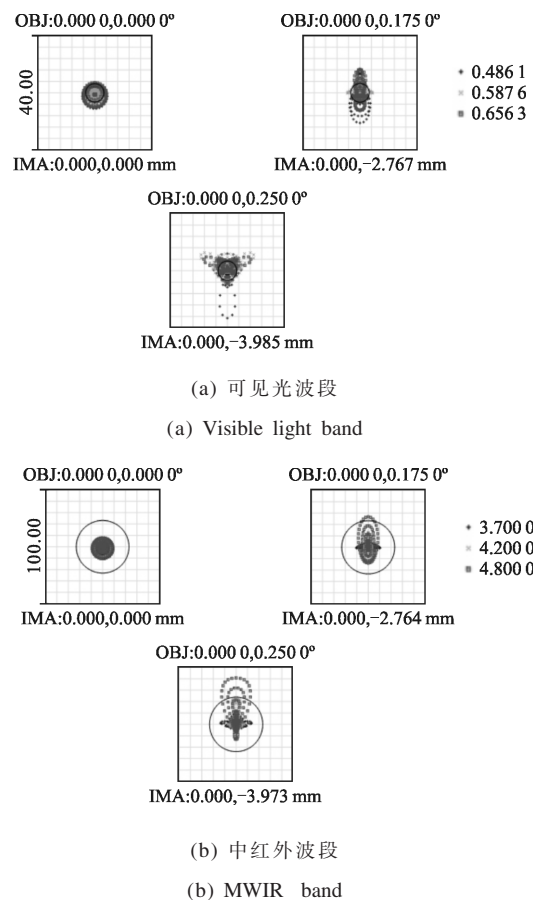
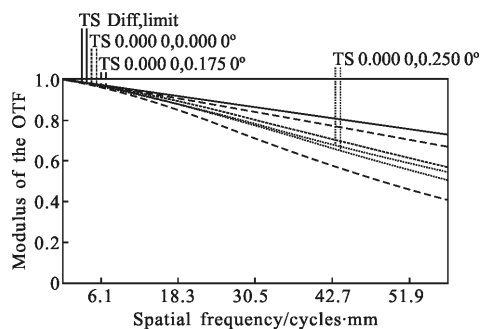


图 4 系统点列图

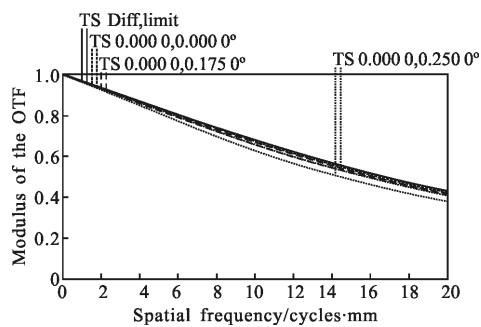
Fig.4 System spot diagrams

图 5 为光学系统在不同视场下的调制传递函数 (MTF) 曲线, 可以看出可见光波段(图(a))在奈奎斯特频率为 时, 系统 MTF 值大于 0.4, 中红外波段(图(b))在奈奎斯特频率为 时, 系统 MTF 值可以达到 0.4, 成像质量接近或达到衍射极限。



(a) 可见光波段

(a) Visible light band



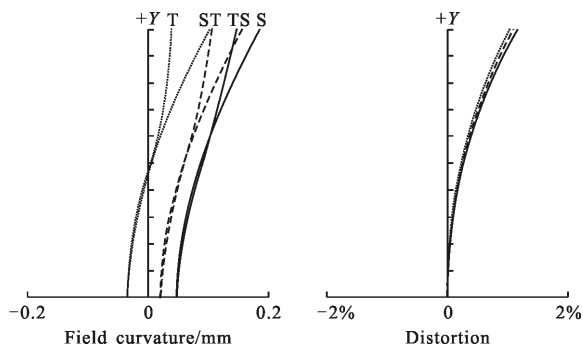
(b) 中红外波段

(b) MWIR band

图 5 调制传递函数

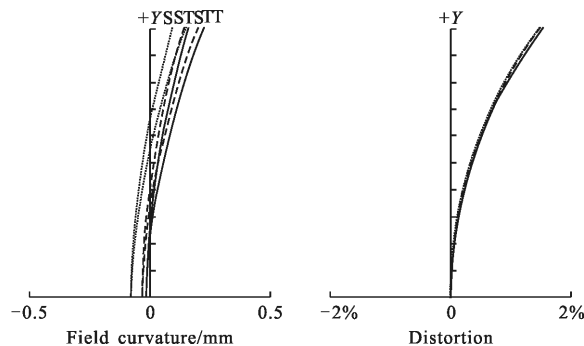
Fig.5 Modulation transfer function

从图 6 各组态的场曲和畸变图可以看出, 可见光波段(图(a))光学系统全视场下 $f-\theta$ 畸变值在 2% 以内, 场曲控制在 0.25% 以内; 中红外波段(图(b))光



(a) 可见光波段

(a) Visible light band



(b) 中红外波段

(b) MWIR band

图 6 场曲畸变图

Fig.6 Diagram of curvature of field and distortion

学系统在全视场下 $f-\theta$ 畸变值在 2% 以内, 场曲控制在 0.2% 以内, 不论是可见光波段还是中红外波段, 系统的场曲和畸变满足系统成像质量要求。

4 双波段消热差、齐焦及探测距离分析

4.1 双波段消热差分析

当温度发生变化时, 由于材料的热胀冷缩, 光学元件表面的曲率、中心厚度、折射率以及光学元件之间的间隔都发生了相应的变化, 这将影响经过光学系统光线的光程, 从而降低光学系统的成像质量。设计的双波段共口径/共光路光学系统使用的材料可同时透过可见光和中红外光, 受温度影响很大, 因此在设计可见光/中红外双波段光学系统时应充分考虑环境温度对光学系统性能的影响。为了改善由于热效应带来的光学系统成像质量的降低, 对系统必须进行消热差处理。消热差的方法主要有机械被动式、机电主动式和光学被动式, 综合比较三种消热差的设计方法^[11], 考虑到系统结构的简单性和稳定性, 通过引入二元衍射面对系统在 $-40\sim+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 温度范围内使用光学被动式进行消热差分析。

根据瑞利判据, 温度变化造成的系统离焦量小于一定的误差容限即可。温度变化造成的像面离焦关系式为:

$$\Delta l \leq \pm 2\lambda_D F_2 \quad (24)$$

式中: λ_D 为中心波长; F 为系统 F 数, 由焦深公式(24)可以计算出可见光和中波红外系统的焦深分别为 $10.22, 66.60\ \mu\text{m}$ 。像面离焦(Δl)必须小于等于系统焦深, 该系统在不同波段处各焦距位置像面离焦情况

见表 5 所示。

表 5 可见光/中波红外波段离焦量和温度的关系
(单位:mm)

Tab.5 Relationship between the defocus amount and the temperature in the visible/MWIR band (Unit:mm)

Temperature/°C	Focal length/mm	
	Visible	MWIR
60	90.001	90.028
20	90.000	90.000
-40	89.994	89.991

4.2 双波段齐焦分析

通过焦距补偿原理,光焦度的合理分配,计算出满足在不同波段处系统焦距相等的一组解,进行初始结构的设计和优化。这种方法可以抵消不同波段间的焦距差异,保持双波段对应结构焦距的一致性。在不同温度下,可见光、中波红外波段系统的焦距值如图 7 所示,图中 A 曲线表示可见光,B 曲线表示中波红外。

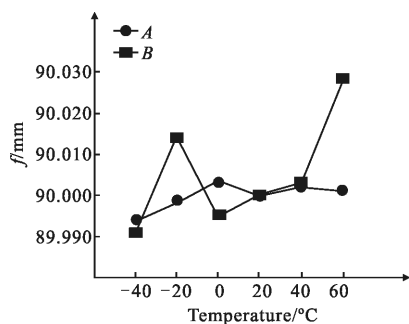


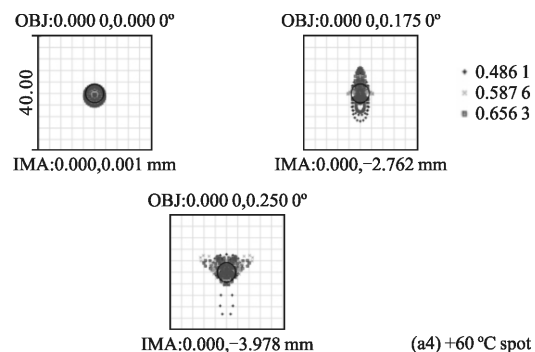
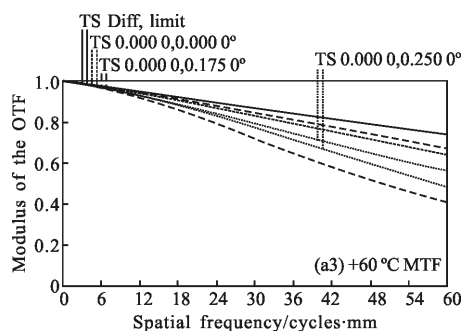
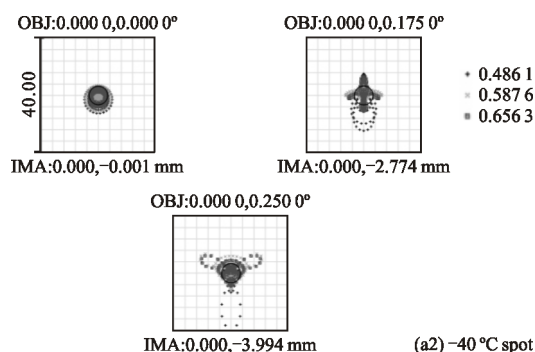
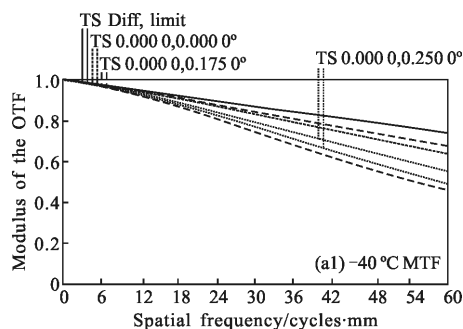
图 7 不同温度下可见光/中波红外的焦距值

Fig.7 Focal length of visible/MWIR at different temperatures

图 7 可知,在不同温度下实现了可见光、中波红外对目标信息的同步观测、同步跟踪、同步测量。可见光波段系统最大离焦量为 $6\ \mu\text{m}$,中红外波段系统最大离焦量为 $28\ \mu\text{m}$,均小于不同波段系统的焦深(可见光和中波红外系统的焦深分别为 10.22 、 $66.60\ \mu\text{m}$),达到了双波段同时对同一个目标清晰成像的目的。在观测目标时,进行光路转换不需要重新切换通道,可直接寻找并观测,提高了不同波段观测目标的一致性和光学系统的反应速度。

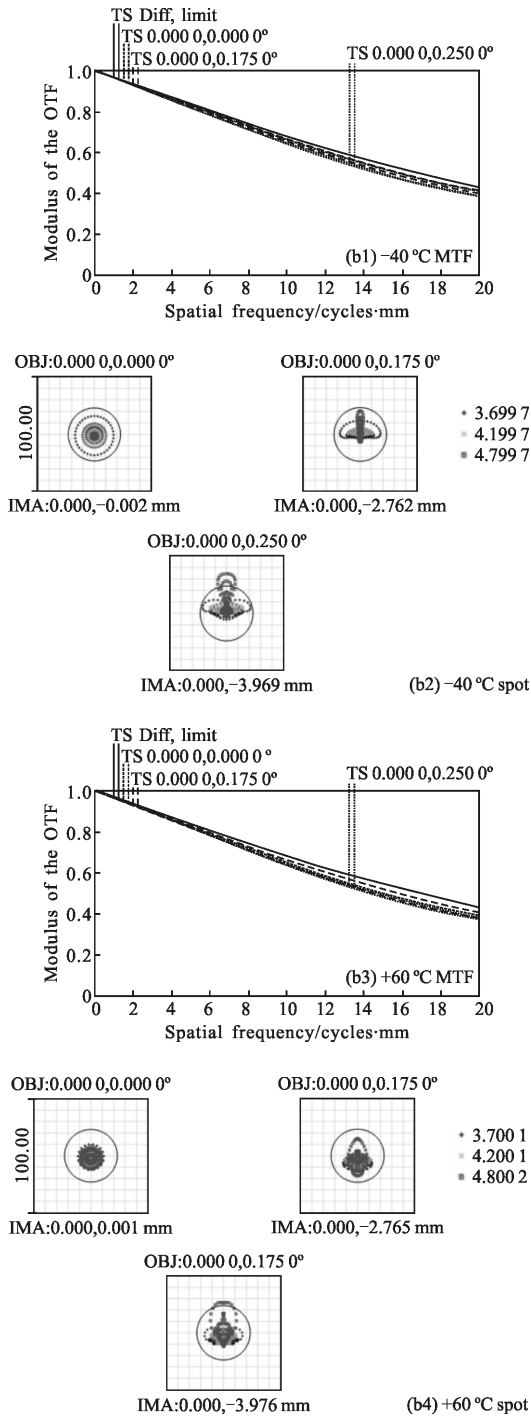
4.3 消热差后系统传递函数图和点列图

图 8 给出了 $-40\ ^\circ\text{C}$ 和 $+60\ ^\circ\text{C}$ 时系统在可见光和中红外波段的传递函数和点列图。从图中可以看出,消热差后双波段光学系统成像质量均满足要求。



(a) $-40\ ^\circ\text{C}$ 、 $+60\ ^\circ\text{C}$ 时可见光系统的调制函数曲线和点列图

(a) MTF and spot diagram of visible system at $-40\ ^\circ\text{C}$, $+60\ ^\circ\text{C}$



(b) -40 °C、+60 °C 时中红外波段的传递函数和点列图
 (b) MTF and spot diagram of MWIR system at -40 °C, +60 °C

图 8 -40 °C、+60 °C 时光学系统的传递函数曲线、点列图

Fig.8 MTF and spot diagram of optical system at -40 °C, +60 °C

4.4 探测距离分析

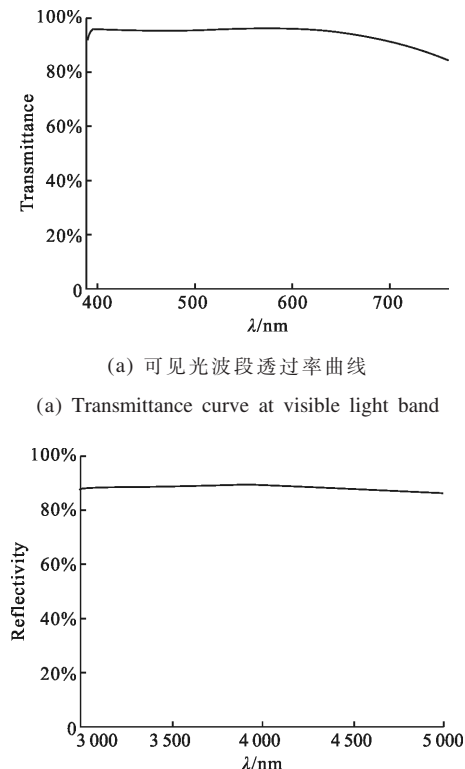
光学系统的探测距离是成像系统综合性能的一个重要指标，也是进行系统总体设计的一个重要依据。可见光系统探测性能与目标背景特性、大气传

输、光学系统和 CCD 性能有关。当目标辐射出射度经过一定距离的传播，到达 CCD 靶面形成的靶面照度大于等于 CCD 器件的最小靶面照度时，则系统可探测到目标。当目标进入靶面的照度等于 CCD 的最小靶面照度时，为探测极限，此时目标距离光学系统的距离为最大探测距离。而传输损耗主要取决于大气透过率 τ_a 与光学系统透过率 τ_0 和 F 数。光学系统的探测距离为：

$$R = \frac{1}{\varepsilon} \ln \frac{E_0 \rho \tau_0 C^2}{4F^2 E_{\min}} \quad (25)$$

式中： ε 为大气衰减因子，也称消光系数； E_0 为景物照度； ρ 为目标反射率； C 为目标处的对比度； E_{\min} 为 CCD 的最小靶面照度。

根据光在介质中的传播原理进行光学系统总透过率的计算，分光元件膜系选用截止滤光片，在可见光波段高透，透射率可达到 85% 以上，在中红外波段高反，反射率可达到 86.5% 以上，如图 10 所示。按光



(a) 可见光波段透射率曲线

(a) Transmittance curve at visible light band

(b) 中红外波段反射率曲线

(b) Reflectivity curve at MWIR

图 10 分光镜的透射率曲线

Fig.10 Transmittance curve of spectroscope

能量最小透过率进行计算，得到可见光光学系统总透过率为 64.7%，中波红外光学系统总透过率为

67.5%，光学系统的 F 数为 3。假设目标反射率为 0.3，对比度为 0.45，景物照度为 20 000 lx，CCD 器件最小靶面照度为 5.5 lx，消光系数 ε 的计算可参考具体气象条件下大气能见距离来计算， $\varepsilon=3.912/R_v$ ，标准晴朗气象条件，水平能见距离 $R_v=23.5 \text{ km}^{[12]}$ 。经计算得出，可见光系统的探测距离为 8.3 km。

红外光学系统的探测能力与目标辐射强度、大气衰减、光学系统和红外焦平面阵列性能相关。小哈德逊公式为：

$$R = \sqrt{\frac{\pi D_0^2 D^* J \tau_\alpha \tau_0}{4 \sqrt{A_d \Delta f} (V_s/V_n)}} \quad (26)$$

式中： D_0 为光学系统的通光口径； D^* 为探测器的比探测率； J 为目标辐射强度； τ_α 为大气透过率； τ_0 为光学系统透过率； Δf 为电子系统带宽； V_s/V_n 为图像检出信噪比。

红外光学系统的 F 数为 3，通光口径为 30 mm，大气透过率为 0.5，红外焦平面阵列的面元大小为 6.4 mm×6.4 mm，探测器的比探测率为 $2 \times 10^{11} \text{ cm} \cdot \text{Hz}^{1/2}/\text{W}$ ，目标辐射强度为 120 W/sr，电子系统带宽为 500 Hz，图像检出信噪比为 $5^{[13]}$ 。经计算可得出红外光学系统最大探测距离为 9 km。综上可见光和中波红外系统探测距离的计算和分析，双波段光学系统可探测到 5 km 以上的目标信息，实现远距离、快速探测。

5 结 论

文中通过对双波段齐焦和消色差的理论推导，设计了折/衍射双波段齐焦光学系统，具有共口径/共光路的特点。该系统可以同时接收可见光波段和中波红外波段的目标信息，从而提高了探测目标信息的一致性和探测准确度。所设计的可见光波段光学系统的总体积为 81.7 mm×26.9 mm，其传递函数值在奈奎斯特频率 61 lp/mm 时高于 0.4，红外波段系统的总体积为 81.7 mm×27.5 mm，其传递函数值在奈奎斯特频率 20 lp/mm 时达到 0.4，点列图各视场像点都集中在单个探测器范围内。成像系统采用正、负透镜与衍射面相结合的方法，实现可见光和中波红外双波段融合成像，通过双波段齐焦分析，可见光系统的最大离焦量为 6 μm ，中波红外系统的最大离焦量为 28 μm ，均在各自的焦深范围以内，并对系统的探测距离进行计算，双波段齐焦光学系统的探测

距离均在 5 km 以上，达到全天候、远距离侦查的目的。在 -40~+60 $^{\circ}\text{C}$ 温度范围内，光学系统引入衍射面实现了光学被动式消热差，系统成像质量满足要求。

参 考 文 献：

- [1] Nicholas Allan, Thompson. Optical design of common aperture common focal plane, multispectra optics for military applications [J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(6):061308.
- [2] Nevo Y. Dual-band optics[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(5): 053002.
- [3] Vizgaitis J N, Hastings A. Dual band infrared picture-in-picture systems[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(6): 061306.
- [4] Cheng Zhifeng, Liu Fuhe, Xun Xianchao. Opto-mechanical design and analysis of dual-band sharing aperture imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3366-3372. (in Chinese)
程志峰, 刘福贺, 荀显超. 双波段共口径成像系统光机设计与分析[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(11): 3366-3372.
- [5] Liu Jun, Chen Yang. Visible/infrared dual-band large field shared-aperture and parfocal optical system [J]. *Journal of Xi'an Technological University*, 2014, 34(2): 88-92. (in Chinese)
刘钧, 陈阳. 可见光/红外双波段大视场共口径齐焦光学系统[J]. 西安工业大学学报, 2014, 34(2): 88-92.
- [6] Li Yan, Zhang Bao, Hong Yongfeng, et al. Optical design of harmonic diffractive infrared dual-band and dual-field system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(11): 200-204. (in Chinese)
李岩, 张葆, 洪永丰, 等. 谐衍射红外双波段双视场光学系统设计[J]. 光学学报, 2013, 33(11): 200-204.
- [7] Li Xijie, Liu Jun, Chen Yang. Design of dual-band, high zoom ratio and continuous co-focal optical system [J]. *Acta Photonica Sina*, 2016, 45(10): 46-55. (in Chinese)
李西杰, 刘钧, 陈阳. 双波段大变倍比连续共变焦光学系统设计[J]. 光子学报, 2016, 45(10): 46-55.
- [8] Qu Rui, Deng Jian. Methods of correcting between-band chromatic aberration in infrared dual-band dual-field of View athermalized optical design[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(1): 2-6. (in Chinese)
曲锐, 邓健. 红外双波段双视场消热差光学系统设计中消波段间色差条件(方法)的研究[J]. 光学学报, 2015, 35(1): 2-6.
- [9] Zhang Bao, Cui Enkun, Hong Yongfeng. Infrared MWIR/LWIR dual-FOV common-path optical system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(2): 396-400. (in Chinese)

- 张葆, 崔恩坤, 洪永丰. 红外双波段双视场共光路光学系统[J]. 光学 精密工程, 2015, 23(2): 396-400.
- [10] Jiang Lun, Hu Yuan, Dong Keyan, et al. Passive athermal design of dual-band infrared optic system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(11): 3353-3357. (in Chinese)
- 江伦, 胡源, 董科研, 等. 红外双波段光学系统被动式消热差设计[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(11): 3353-3357.
- [11] Bai Yu, Liao Zhiyuan, Liao Sheng, et al. Infrared dual band athermal optical system with common aperture[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(2): 269-276. (in Chinese)
- 白瑜, 廖志远, 廖胜, 等. 共孔径消热差红外双波段光学系统[J]. 光学 精密工程, 2016, 24(2): 269-276.
- [12] Shi Kui, Chen Zhaobing. Detecting capability research of the plane carrying short focus television [J]. *Ship Electronic Engineering*, 2014, 34(5): 140-143. (in Chinese)
- 时魁, 陈兆兵. 某机载短焦距电视探测能力研究 [J]. 舰船电子工程, 2014, 34(5): 140-143.
- [13] Pan Mingjie, Lian Xu, Zhang Honggang. A method estimating the detection range ofIRST [J]. *Electronics Optics and Control*, 2012, 19(9): 47-49. (in Chinese)
- 潘明杰, 连续, 张红刚. 红外搜索跟踪系统探测距离估算方法[J]. 电光与控制, 2012, 19(9): 47-49.