

红外双波段共光路环形孔径超薄成像系统设计

王 琦, 朴明旭*, 孟禹彤, 高旭东

(长春理工大学 光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘 要: 针对中长波红外双波段系统的元件数量多、结构复杂等问题, 分析了环形孔径超薄成像系统的结构特点, 给出了系统初始结构遮拦比的计算方法, 并设计了一种适用于中长波红外双波段的共光路环形孔径超薄成像系统, 焦距为 50 mm、全视场为 14° 、 F 数为 1。系统仅由单一光学元件构成, 结构简单且光路紧凑, 其轴向尺寸与焦距的比值为 0.48。在空间频率 20 lp/mm 处, 中波红外 3~5 μm 波段的全视场调制传递函数大于 0.45, 长波红外 8~10 μm 波段的全视场调制传递函数大于 0.30, 同时实现了 -40~80 $^\circ\text{C}$ 温度范围内的红外双波段无热化。通过公差分析可知该系统具备可加工性, 且基底材料为红外硫系玻璃, 可以通过精密模压的方法进行批量化生产。该研究为低成本、小型化红外双波段系统的实现提供了新的思路。

关键词: 光学设计; 红外双波段成像; 环形孔径; 小型化; 非球面

中图分类号: O435 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20200270

Design of infrared dual-band common path annular aperture ultrathin imaging system

Wang Qi, Piao Mingxu*, Meng Yutong, Gao Xudong

(School of Optoelectronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to solve the problems of the large number of components and complex structure in the mid-long wave infrared dual-band system, the structural characteristics of the annular folded imaging system was analyzed, and the calculation method of the obscuration ratio was explained. An infrared dual-band annular aperture ultrathin imaging system with common path was designed. The focal length is 50 mm, the field of view is 14° , and F number is 1. The system is made up of only one optical element, so it has simple structure and compact optical path. The ratio of total optical length to focal length is 0.48. At the spatial frequency of 20 lp/mm, the modulation transfer function (MTF) of the full field of view is more than 0.45 in medium wave infrared 3-5 μm , and that is more than 0.30 in long wave infrared 8-10 μm . The athermalization of system is realized in the range of -40-80 $^\circ\text{C}$. According to the tolerance results, this system is machinable. The chalcogenide glasses used for the substrate material can be precision molded to achieve batch processing. The study provides a new idea for the realization of low-cost and miniaturized infrared dual-band system.

Key words: optical design; infrared dual-band imaging; annular aperture; miniaturization; aspheric

0 引言

红外双波段成像系统可以获得两个不同波段的目标信息,具有较强的环境抗干扰能力,从而有效提高了目标的探测率和识别率。由于同时透过红外双波段的材料种类十分有限,目前的红外双波段成像系统很难兼顾成像质量和系统结构,导致红外双波段成像系统的尺寸较大,无法应用于对尺寸及质量有严格限制的情况,例如远程监控或无人机负载等。因此,红外双波段成像系统的小型化越来越受到人们的关注^[1]。

目前,大部分紧凑型红外成像系统采用的是折反式系统,折反式系统能较大程度减小系统尺寸。这类系统中反射结构承担主要光焦度,通过校正板或校正镜组实现像差校正,但系统元件数量也会因此增加,使得系统的加工与装配难度大大增加^[2-5]。与此相比,超薄系统的结构不需要安装额外的校正镜组,可以显著简化系统,缩短系统尺寸,从而实现系统的小型化。在可见光波段,Tremblay E J^[6-7]、戈兰^[8]等都以氟化钙为基底设计了环形孔径超薄成像系统,大幅度缩小了系统长度;Li Lei 等^[9]将环形超薄镜头与液体透镜结合,实现了对变焦系统的小型化;孟禹彤等^[10]将超薄系统与衍射光学结合,采用光学塑料降低系统成本,并实现了对色差的校正。在红外波段,Du Ke 等^[11]提出了一种四次折叠反射双波段红外成像系统,该系统以铝作为反射镜基底,中间的介质为空气,虽然系统不产生色差,但四片反射镜加工困难,装调复杂;虞林瑶等^[12]设计了一种超紧凑单片成像光学系统,该系统只能用于中波红外的成像系统中,无法满足中长波红外双波段的成像要求。

针对红外系统的尺寸普遍较大、加工成本高、装调困难以及不利于批量化生产等问题,文中分析了环形孔径超薄成像系统的设计原理,给出了系统初始结构遮拦比的计算方法,并设计了工作在 3~5 μm 和 8~10 μm 波段范围的具有大相对孔径的红外双波段共光路环形孔径超薄成像系统。该系统将多个环形反射面加工到同一基底材料的前后表面,光线通过系统最外侧的环形孔径进入光学系统,经过前后表面上的环带反射面多次反射,沿“之”字路径传递,最终成像在像面。系统各个面型之间由基底材料连接,结构更稳定。光线在系统中经过多次反射折叠,实现了对光

学系统光路的压缩,大大减小了轴向尺寸。该系统的基底材料为红外硫系玻璃,可以通过精密模压的方式对前后两个表面的面型进行加工,有利于批量化生产。

1 超薄成像系统设计原理

超薄成像光学系统的特点是多个环形反射面位于同一基底材料上,光线通过超薄透镜最外侧环带进入其内部,在内部发生多次反射,最终到达像面。超薄系统的结构简单,不需要额外的校正镜组,能够较大程度减小系统长度,可以看作反射镜间有玻璃介质的同轴反射式光学系统^[13-14]。图 1 为超薄成像光学系统原理结构示意图。

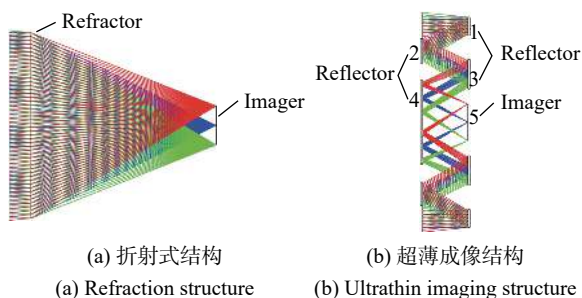


图 1 超薄成像光学系统原理结构示意图

Fig.1 Principle and structure of ultrathin imaging optical system

传统折射式系统透镜模型如图 1(a) 所示,利用多个反射镜对该系统的光路进行折叠压缩,并将第一个反射面设置为主反射面,承担系统主要光焦度,就可以显著减小光学系统的轴向长度,得到如图 1(b) 所示的反射式光学系统。然后在该反射式系统的各个反射镜之间填充光学材料,就可以得到环形孔径超薄成像光学系统的理想模型^[15]。超薄成像镜头的系统总长 T 与反射次数 N 的关系为:

$$T = \frac{F \cdot n_s}{N} \quad (1)$$

式中: F 为系统焦距; n_s 为反射镜之间介质材料的折射率;因为同轴反射系统的物方与像方一般位于系统的两侧,所以反射次数 N 一般为偶数。

由于折叠后的系统是多次共轴反射,可以看出后续的反射面会对入射的光线产生遮挡,只有入射到最外侧环形孔径的光线才能进入系统,最终到达像面。因此,定义环形孔径超薄成像系统的遮拦比 α 为:

$$\alpha = \frac{d}{D} \quad (2)$$

式中： D 为环形通光孔径的外直径； d 为拦光区域的直径，即环形通光孔径的内直径。根据同轴反射系统的结构特点，为保证进入系统的边缘光线能被第二面反射镜反射，将第二面反射镜边缘光线对应高度设定为拦光区域的半径。当对图 1(a) 系统进行 N 次等距离的反射折叠时，可以得到：

$$\frac{D - 2F \tan \omega}{Fn_s} = \frac{(1 - \alpha_1)D}{T} \quad (3)$$

经整理可得：

$$\alpha_1 = 1 - \frac{T}{Fn_s} + \frac{2T \tan \omega}{Dn_s} \quad (4)$$

将公式 (1) 代入，化简可得：

$$\alpha_1 = 1 - \frac{1}{N} + \frac{2F \tan \omega}{ND} \quad (5)$$

式中： ω 为系统的半视场； α_1 为由第二面反射镜决定的系统遮拦比。值得注意的是，系统除了第二个反射面会产生遮拦外，到达系统像面的边缘视场光线也有可能被倒数第二个反射面的内边缘阻挡，即图 1(b) 中的与像面相邻的反射面 3 对到达像面 5 的光线产生遮挡，此时由反射面 3 决定的系统遮拦比为：

$$\alpha_2 = 2(N - 1) \frac{F \tan \omega}{D} \quad (6)$$

公式 (5) 和公式 (6) 分别表示图 1(b) 中反射面 2 和反射面 3 对系统遮拦的影响。为保证通过环形孔径的光线经过系统时不会被遮挡，系统的遮拦比 α 应取决于 α_1 和 α_2 中的较大值，即 $\alpha = \max(\alpha_1, \alpha_2)$ 。当反射面 2 和反射面 3 对系统的遮拦比影响作用相同，即 α_1 与 α_2 相等时，可以得到公式 (5) 与公式 (6) 两条函数曲线交点位置的半视场 ω_0 ：

$$\omega_0 = \arctan \left[\frac{D(N - 1)}{2F(N^2 - N - 1)} \right] \quad (7)$$

当系统焦距 F 及反射次数 N 确定时，通过公式 (5) 和公式 (6) 可以得到系统半视场 ω 与遮拦比 α 之间的关系曲线，如图 2 所示。

图 2 中拐点位置即为公式 (5) 和公式 (6) 两条函数曲线交点 ω_0 的位置。当系统的半视场 $\omega \leq \omega_0$ 时， $\alpha_1 \geq \alpha_2$ ，此时反射面 2 对于系统的遮拦比的影响更大，系统的遮拦比由公式 (5) 决定；反之则反射面 3 的影响更大，系统的遮拦比由公式 (6) 决定。结合超薄成像系统的结构特点，可以得知系统遮拦比主要与反

射次数相关，反射次数的增加在缩短系统长度的同时，系统的遮拦比也会逐渐增大。除此之外，焦距、视场以及环形通光孔径的外直径也会对系统的遮拦造成影响。

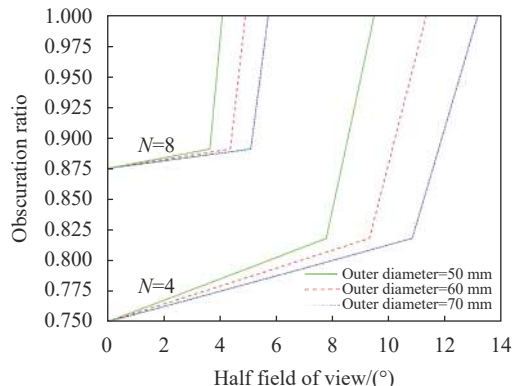


图 2 当 $F=50$ mm 时，半视场与遮拦比的关系曲线

Fig.2 Relation curve between half field of view and obscuration ratio when $F=50$ mm

由于遮拦的存在，能进入光学系统的光只有最外侧的环形区域。为了对比环形孔径超薄光学系统和传统折射式光学系统的光线收集率，可以通过面积公式求出与此环形孔径面积相等的圆形有效孔径 d_{eff} ，其表达式为：

$$d_{\text{eff}} = D \sqrt{1 - \alpha^2} \quad (8)$$

当有效孔径确定时，可以得到超薄成像系统外径 D 与遮拦比 α 的关系，如图 3 所示。由图 3 可知，当遮拦比增大时，为保证系统的有效孔径，系统的外径尺寸显著增加。所以对于将要设计的红外双波段共光路环形孔径超薄成像系统，既要保证成像光束顺利通过各环带反射面而不发生遮挡，又要减小超薄成像系统外径尺寸，需要选择合适的反射次数及遮拦比。

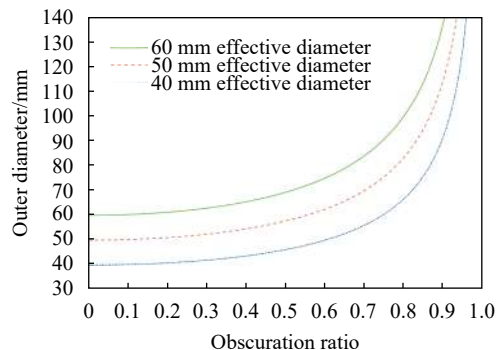


图 3 外孔径与遮拦比的关系曲线

Fig.3 Relation curve between outer diameter and obscuration ratio

2 红外双波段共光路超薄系统设计

2.1 设计实例

所设计的红外双波段共光路环形孔径超薄成像系统设计指标如表 1 所示。由于红外材料中能同时透过中波和长波红外的材料种类较少, 并且还要考虑材料的可加工性等因素, 最终选择红外硫系玻璃材料 IRG24 (Ge₁₀As₄₀Se₅₀) 作为红外双波段超薄成像系统的基底材料^[16]。该材料在中波及长波红外波段范围内有高透过率, 并且具有低色散特性和较小的折射率温度系数, 此外还可以通过精密模压的方式进行批量化加工, 有利于降低加工成本。

表 1 红外双波段共光路超薄系统的设计指标

Tab.1 Design index of the infrared dual-band common path ultrathin system

Parameter	Value
Effective Focal length/mm	50
Effective aperture diameter/mm	50
Field of view/(°)	14
Length of the system/mm	≤32
Wavelength/μm	3-5, 8-10

系统的焦距为 50 mm, 当基底材料及反射次数 N 确定时, 根据公式 (1) 就可以求出超薄系统的轴向尺寸。将有效孔径 $d_{\text{eff}}=50$ mm 代入公式 (8) 并分别与公式 (5) 及公式 (6) 联立方程组, 可以求出两组遮拦比及外孔径的值。为保证系统光线不被遮挡, 选择求解中的遮拦比较大的一组值作为系统的遮拦比及外孔径。不同反射次数的系统初始结构尺寸如表 2 所示。

表 2 环形孔径超薄系统尺寸对比

Tab.2 Size comparison of annular aperture ultrathin system

Structural type	Track/mm	Diameter/mm	Obscuration ratio
2 reflectors	65.0	62.4	0.598
4 reflectors	32.5	81.2	0.788
6 reflectors	21.7	96.3	0.855
8 reflectors	16.3	109.2	0.889

由表 2 可知, 随着反射次数的增加, 成像系统虽然轴向长度有所缩短, 但遮拦比及外孔径会大幅度增

加。二次反射式系统的轴向长度是四次反射式系统的一倍, 而六次和八次反射式系统的外孔径相比与四次反射式系统分别增大 19% 及 34%。过大的系统长度或口径都不利于元件的生产及加工, 也会影响成像元件的强度, 从而降低系统在复杂环境条件下的稳定性。综合考虑, 四次反射式成像系统结构更适合当前系统的设计指标。

先根据系统的结构在 ZEMAX 软件中搭建只有一个反射面的光学系统模型, 然后逐步添加后续的三个反射面对第一反射面到像面的距离进行四次等长度的折叠, 系统的轴向尺寸会大大缩短。将各个反射面之间的介质替换为硫系玻璃材料 IRG24, 并通过合理分配四个反射面的光焦距, 在优化系统的同时调整各个表面之间的距离, 以保持系统的光路结构及总长。

为了提高超薄成像系统在中长波红外波段的成像质量, 将各环带反射面的面型设置为偶次非球面, 其方程如下:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + Ar^2 + Br^4 + Cr^6 + Dr^8 + Er^{10} + \dots \quad (9)$$

式中: z 为表面矢高; c 为顶点处的基本曲率; k 为圆锥曲线常数; r 为非球面表面上点的径向坐标; A 、 B 、 C 、 D 和 E 等参数皆为非球面系数。表 3 为优化后系统的结构参数, 面 1~面 6 皆为偶次非球面, 表 4 为各环带表面的偶次非球面系数。最终得到中长波红外双波段共光路环形孔径超薄成像系统的结构如图 4(a) 所示, 系统整体的截面图如图 4(b) 所示。

表 3 红外双波段共光路超薄系统参数

Tab.3 System data of infrared dual-band common path ultrathin system

Surface	Radius /mm	Thickness /mm	Glass
Object	Infinity	Infinity	-
Stop	-535.73	25.5	IRG24
2	-99.92	-24.1	Mirror
3	-137.86	19.6	Mirror
4	161.59	-20.8	Mirror
5	786.41	21.4	Mirror
6	-1 157.55	1.1	-
Image	Infinity	-	-

表 4 红外双波段共光路超薄系统的非球面系数

Tab.4 Detail data of even asphere of infrared dual-band common path ultrathin system

Surface	A	B	C	D	E
1	0.00	3.85E-07	-2.36E-10	1.18E-13	-5.27E-17
2	0.00	2.99E-07	6.25E-12	-2.84E-14	0.00
3	0.00	1.96E-06	-2.15E-09	9.36E-13	0.00
4	0.00	-1.87E-06	-8.15E-09	1.82E-11	-7.81E-15
5	0.00	-5.20E-06	-2.54E-09	6.73E-11	8.77E-14
6	0.00	-4.72E-04	1.39E-06	-2.22E-08	1.47E-10

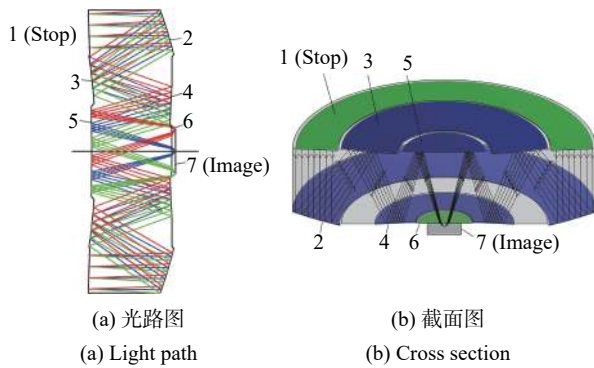


图 4 红外双波段共光路超薄系统结构

Fig.4 Structure of infrared dual-band common path ultrathin system

从图 4 可以看出, 中长波红外双波段共光路环形孔径超薄成像系统包括一个超薄成像光学元件与成

像平面, 超薄成像光学元件的前后两个表面均包括一个中心圆形孔径以及与该孔径具有相同光轴的中间环带孔径和外层环带孔径。前表面的中心圆形孔径 5 和中间环带孔径 3 镀有反射膜, 外层环带孔径 1 镀有减反射膜。后表面的中心圆形孔径 6 镀有减反射膜, 中间环带孔径 4 和外层环带孔径 2 镀有反射膜。而同一侧表面的各个圆形孔径及环带孔径之间的区域镀有遮光材料, 可以有效防止外界杂散辐射进入系统, 对成像造成不良影响。红外双波段共光路环形孔径超薄成像系统的光阑位于超薄成像光学元件的前表面外层环带孔径 1 处。成像光线通过前表面外层环带孔径 1 进入超薄成像光学元件, 在后表面的外层环带孔径 2 处发生第一次反射, 反射光线到前表面中间环带孔径 3 处发生第二次反射, 反射光线到后表面中间环带孔径 4 处发生第三次反射, 反射光线再到前表面中心圆形孔径 5 处发生第四次反射, 最后光线通过后表面中心圆形孔径 6 折射聚焦到成像平面 7。

最终得到中长波红外双波段共光路环形孔径超薄成像系统的有效通光孔径为 50 mm, 焦距为 50 mm, 外孔径为 75 mm, 遮拦比为 75%, 系统轴向长度仅为 24 mm, 系统总长与焦距的比值为 0.48。系统的调制传递函数 (Modulation Transformation Function, MTF) 如图 5 所示, 系统的点列图如图 6 所示。

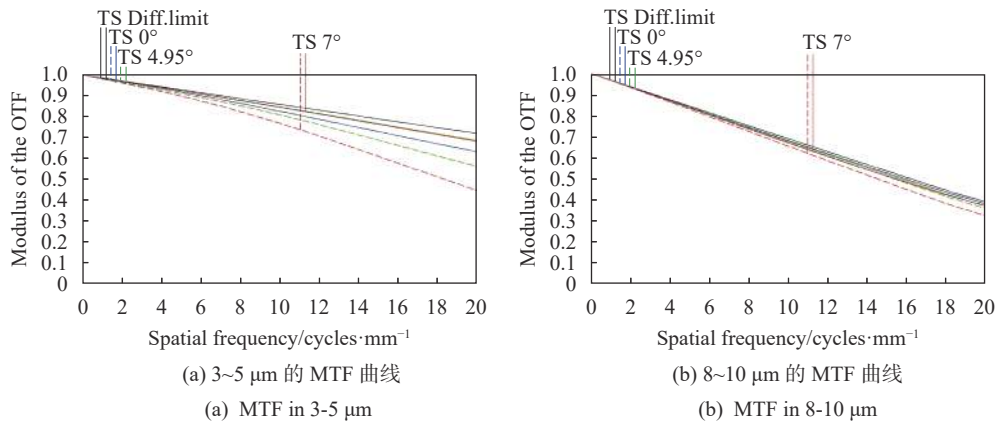


图 5 红外双波段共光路超薄系统的 MTF 曲线

Fig.5 MTF of infrared dual-band common path ultrathin system

由图 5 可知, 在中波红外 3~5 μm 波段, 空间频率为 20 lp/mm 时系统中心视场的 MTF 大于 0.63, 边缘视场的 MTF 在子午方向大于 0.45, 在弧矢方向大于 0.65; 在长波红外 8~10 μm 波段, 空间频率为 20 lp/mm

时系统中心视场及边缘视场的 MTF 在子午方向和弧矢方向皆大于 0.30。该超薄成像光学系统的 MTF 曲线在中长波红外双波段都接近衍射极限, 满足中长波红外双波段高质量成像的需求。

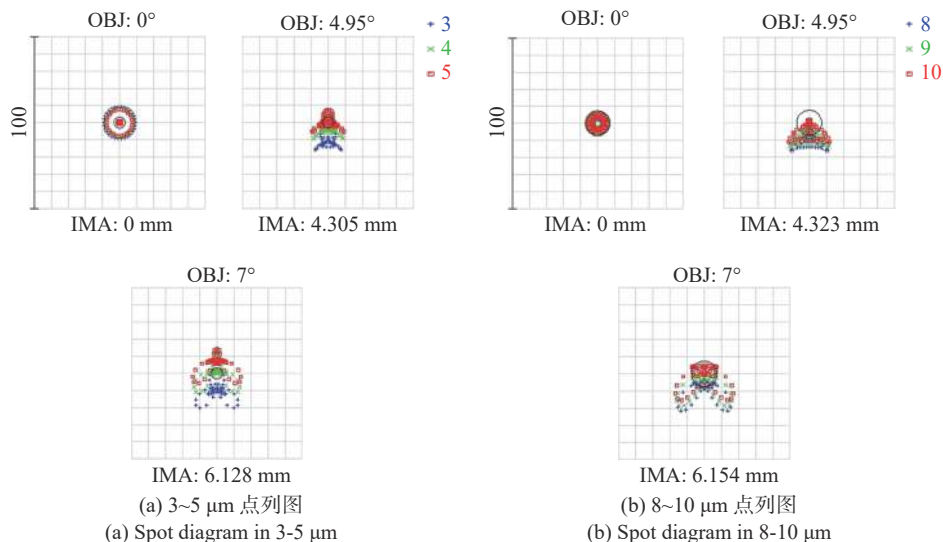


图 6 红外双波段共光路超薄系统点列图

Fig.6 Spot diagram of infrared dual-band common path ultrathin system

由图 6 可知, 在 3~5 μm 波段范围, 系统中心视场的均方根 (Root Mean Square, RMS) 光斑半径为 5.73 μm, 边缘视场的 RMS 光斑半径为 9.67 μm; 在 8~10 μm 波段范围, 系统中心视场的 RMS 光斑半径为 4.57 μm, 边缘视场的 RMS 光斑半径为 10.43 μm。系统在中长波红外波段的全视场弥散斑均在一个像元尺寸范围内 (25 μm)。

2.2 公差分析

由于红外双波段共光路环形孔径超薄成像系统采用的加工方式是在单一基底材料的前后表面加工环形或圆形的折射面及反射面, 系统各个面型之间由基底材料连接, 不需要额外安装, 因而对系统影响最大的是超薄透镜的加工环节。对系统的厚度、偏心、倾斜、非球面面型误差等因素进行灵敏度公差分析, 采用系统的后截距作为公差补偿^[17]。系统的公差设置如表 5 所示。

表 5 系统的公差设置

Tab.5 Tolerance data of the system

Tolerance type	Tolerance parameter
Thickness/mm	±0.01
Element decenter/mm	±0.02
Element tilt/(°)	±1
Surface decenter/mm	±0.01
Surface tilt/(°)	±1
Aspheric PV value/μm	±0.2
Refractive index	±0.001
Test wavelength/mm	632.8

将表 5 中的公差设置代入到红外双波段超薄成像系统中进行 1000 次蒙特卡洛分析, 以 MTF 作为评价标准, 最终的结果表明, 90% 以上系统在空间频率 20 lp/mm 的 MTF 数值如表 6 所示。

表 6 公差分析后系统的 MTF

Tab.6 MTF of the system after tolerance analysis

Wavelength/μm	Field/(°)	Tangential		Sagittal	
		Nominal	Estimated	Nominal	Estimated
3-5	0	0.66	0.40	0.65	0.41
	4.9	0.59	0.38	0.71	0.49
	7	0.48	0.31	0.69	0.46
8-10	0	0.39	0.34	0.42	0.35
	4.9	0.37	0.33	0.41	0.33
	7	0.34	0.30	0.40	0.33

从表 6 的蒙特卡洛分析中可以看出, 在对系统进行加工装调后, 中波红外波段空间频率为 20 lp/mm 处, 系统子午方向的中心视场 MTF 值有 90% 在 0.40 以上, 边缘视场的 MTF 值有 90% 在 0.31 以上, 系统弧矢方向的中心视场 MTF 值有 90% 在 0.41 以上, 边缘视场的 MTF 值有 90% 在 0.46 以上。长波红外波段空间频率为 20 lp/mm 处, 系统子午方向的中心视场及边缘视场 MTF 值皆有 90% 在 0.30 以上, 系统弧矢方向的中心视场及边缘视场 MTF 值皆有 90% 在 0.33

以上。结果说明采用表 4 中的公差分配方式可以满足系统最终的加工要求。

2.3 无热化分析

由于应用红外系统的场景环境一般不稳定,外界温度的变化会引起曲率、厚度及折射率等参数的改变,对红外光学系统的成像产生严重的影响。为保证系统成像质量的稳定,需要对系统进行无热化分析^[18-19]。一般光学系统的无热化设计需要采用多种镜头材料组合的方式,但对于文中的系统,通过合理选择基底材料和分配各个环带反射面所承担光焦度,平衡因温度变化引起的不良影响,实现系统的无热化。系统的基底材料 IRG24 的热膨胀系数为 $2.0 \times 10^{-5}/K$ 。在 $3 \sim 5 \mu m$ 波段的折射率温度系数为 $2.19 \times 10^{-5}/K$,在 $8 \sim 10 \mu m$ 波段的折射率温度系数为 $2.04 \times 10^{-5}/K$ ^[20]。

将红外双波段共光路超薄成像系统的镜筒材料

设置为铝,在 ZEMAX 软件中用 $-40^\circ C$ 、 $20^\circ C$ 和 $80^\circ C$ 的温度建立多重结构。重新设置操作数,添加系统变量,对不同温度及不同波段的结构进行联合优化,得到消热差后的系统在 $-40^\circ C$ 、 $20^\circ C$ 和 $80^\circ C$ 的 MTF 曲线分别如图 7、图 8 及图 9 所示。

从不同温度的 MTF 曲线可以看出,在中波红外波段, $-40^\circ C$ 、 $20^\circ C$ 和 $80^\circ C$ 的中心视场在空间频率 20 lp/mm 处的 MTF 值皆高于 0.6,边缘视场的 MTF 值皆高于 0.4;在长波红外波段, $-40^\circ C$ 、 $20^\circ C$ 和 $80^\circ C$ 的中心视场及边缘视场在空间频率 20 lp/mm 处的 MTF 值皆高于 0.3, MTF 随温度的变化并无明显的变化,仍然接近衍射极限。上述结果表明在 $-40 \sim 80^\circ C$ 的温度范围内,以红外硫系玻璃材料 IRG24 为基底的红外超薄成像系统在中长波双波段的成像受温度变化的影响较小,具有良好的热稳定性。

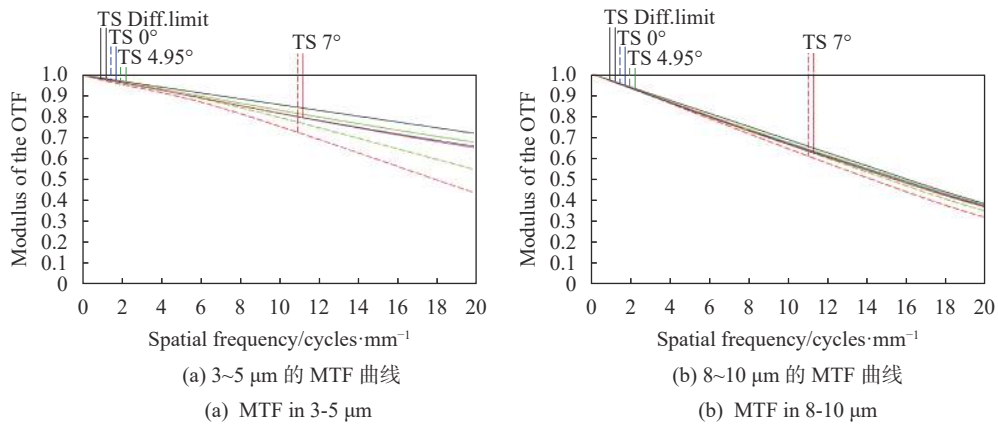


图 7 红外双波段共光路超薄成像系统在 $-40^\circ C$ 的 MTF 曲线

Fig.7 MTF of infrared dual-band common path ultrathin imaging system at $-40^\circ C$

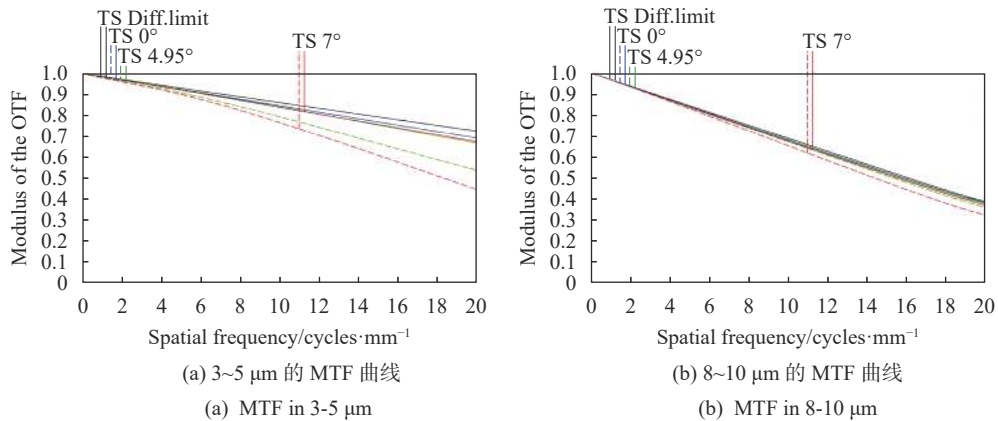


图 8 红外双波段共光路超薄成像系统在 $20^\circ C$ 的 MTF 曲线

Fig.8 MTF of infrared dual-band common path ultrathin imaging system at $20^\circ C$

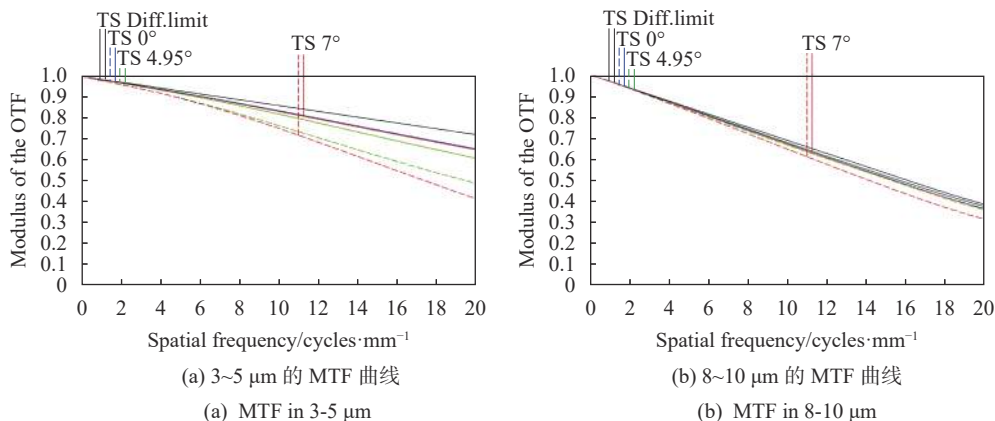


图 9 红外双波段共光路超薄成像系统在 80 °C 的 MTF 曲线

Fig.9 MTF of infrared dual-band common path ultrathin imaging system at 80 °C

3 结 论

文中分析了环形孔径超薄成像系统的结构特点,给出了超薄系统遮拦比的计算方法,并将其应用于红外双波段系统中,设计了适用于中波红外 3~5 μm 和长波红外 8~10 μm 的红外双波段共光路环形孔径超薄成像系统。该光学系统的成像元件仅由一片透镜构成,不需要安装额外校正镜组,光线在透镜内部发生多次反射,实现对中长波红外双波段的高质量成像。该系统在空间频率 20 lp/mm 处,中波红外全视场 MTF 大于 0.45,长波红外全视场 MTF 大于 0.30,系统轴向尺寸与焦距的比值仅为 0.48,远小于传统折射式及折反式红外系统尺寸。同时对该系统进行了无热化设计,实现了-40~80 °C 的宽温度高质量成像。结果表明超薄系统遮拦比的计算方法对系统初始结构的设计有着指导作用,并且环形孔径超薄系统可以在有限的厚度和体积内得到较长的焦距,大幅度缩短了红外双波段系统轴向长度。由于各个反射面分别加工在同一基底材料的前后表面,不需要额外的支架固定及复杂的装调过程,系统更稳定。系统基底材料采用的红外硫系玻璃,可以通过精密模压的方式进行批量化生产,有助于降低加工成本,因此这类系统在未来具有广阔的应用空间。

参考文献:

[1] Jiang Bo, Wu Yuehao, Dai Shixun, et al. Design of a compact dual-band athermalized infrared system [J]. *Infrared Technology*, 2015, 37(12): 999-1004. (in Chinese)
姜波, 吴越豪, 戴世勋, 等. 紧凑型双波段无热化红外光学系统

设计[J]. 红外技术, 2015, 37(12): 999-1004.

[2] Li Peimao, Wang Xia, Jin Weiqi, et al. Dual-band infrared optical system design and image quality evaluation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(11): 2882-2888. (in Chinese)
李培茂, 王霞, 金伟其, 等. 双波段红外光学系统设计与像质评价[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(11): 2882-2888.

[3] Li Jie, Ming Jingqian, Lu Ruofei. Design of an ameliorating infrared Cassegrain optical system [J]. *Infrared Technology*, 2010, 32(2): 76-80. (in Chinese)
李婕, 明景谦, 卢若飞. 一种改进型的红外卡塞格林光学系统设计[J]. 红外技术, 2010, 32(2): 76-80.

[4] Qu Hemeng, Zhang Xin, Wang Lingjie, et al. Design of a low F-number compact athermalizing infrared optical system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3): 0322003. (in Chinese)
曲贺盟, 张新, 王灵杰, 等. 大相对孔径紧凑型无热化红外光学系统设计[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0322003.

[5] Li Ruiyao, Fu Yuegang, Liu Zhiying. Athermalization design of compact medium-wave infrared imaging system [J]. *Infrared Technology*, 2018, 40(2): 119-124. (in Chinese)
李瑞瑶, 付跃刚, 刘智颖. 紧凑型中波红外成像系统无热化设计[J]. 红外技术, 2018, 40(2): 119-124.

[6] Tremblay E J, Stack R A, Morrison R L, et al. Ultrathin cameras using annular folded optics [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(4): 463-471.

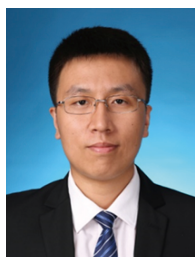
[7] Tremblay E J, Stack R A, Morrison R L, et al. Ultrathin four-reflection imager [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(2): 343-354.

[8] Ge Lan, Liang Zhongcheng. Micro-optics label receiving system based on annular aperture ultra-thin lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(12): 1222001. (in Chinese)
戈兰, 梁忠诚. 基于环型孔径超薄透镜的微光学标签接收系统[J]. 光学学报, 2015, 35(12): 1222001.

- [9] Li Lei, Wang Di, Liu Chao, et al. Ultrathin zoom telescopic objective [J]. *Optics Express*, 2016, 24(16): 18674-18684.
- [10] Meng Yutong, Piao Mingxu, Wang Qi. Design of refractive diffraction hybrid annular aperture ultrathin imaging optical system [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, 48(12): 1211003. (in Chinese)
孟禹彤, 朴明旭, 王琦. 折衍射混合环形孔径超薄成像光学系统设计[J]. *光子学报*, 2019, 48(12): 1211003.
- [11] Du Ke, Cheng Xuemin, Lv Qichao, et al. Design of an ultra-thin dual band infrared system[C]// SPIE, 2014, 9272: 92720U.
- [12] Yu Linyao, Xie Jingjiang, Wei Qun, et al. Super compact optical system design based on single lens [J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(4): 0422006. (in Chinese)
虞林瑶, 谢京江, 魏群, 等. 超紧凑型单片成像光学系统设计[J]. *光学学报*, 2015, 35(4): 0422006.
- [13] Zhang Ruirui, Shen Weimin. Long focal-length optical system using annular aperture [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(4): 1140-1143. (in Chinese)
张蕊蕊, 沈为民. 环形孔径长焦距光学系统[J]. *光学学报*, 2010, 30(4): 1140-1143.
- [14] Galan M, Strojnik M, Wang Y. Design method for compact, achromatic, high-performance, solid catadioptric system (SoCatS), from visible to IR [J]. *Optics Express*, 2019, 27(1): 142-149.
- [15] Zhang Ruirui. Design of ultrathin optical imaging system using annular aperture[D]. Suzhou: Soochow University, 2009: 8-10. (in Chinese)
张蕊蕊. 环形孔径超薄光学成像系统设计[D]. 苏州: 苏州大学, 2009: 8-10.
- [16] Dai Shixun, Chen Huiguang, Li Maozhong, et al. Chalcogenide glasses and their infrared optical applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2012, 41(4): 847-852. (in Chinese)
戴世勋, 陈惠广, 李茂忠, 等. 硫系玻璃及其在红外光学系统中的应用[J]. *红外与激光工程*, 2012, 41(4): 847-852.
- [17] Zhang Bo, Cui Qingfeng, Piao Mingxu, et al. Substrate material selection method for dual-band multilayer diffractive optical elements and its application in the zoom system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(6): 0605001. (in Chinese)
张博, 崔庆丰, 朴明旭, 等. 双波段多层衍射光学元件的基底材料选择方法研究及其在变焦系统中的应用[J]. *光学学报*, 2020, 40(6): 0605001.
- [18] 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.
- [19] Bai Yu, Liao Zhiyuan, Li Hua, et al. Application of the chalcogenide glass in modern infrared thermal imaging systems [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3): 449-455. (in Chinese)
白瑜, 廖志远, 李华, 等. 硫系玻璃在现代红外热成像系统中的应用[J]. *中国光学*, 2014, 7(3): 449-455.
- [20] Romanova G, Pyš G. Research of aberration properties and passive athermalization of optical systems for infrared region[C]//SPIE, 2015, 9626: 96260H.



第一作者简介: 王琦 (1996-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为光学设计。Email: wang1139815@163.com



通讯作者简介: 朴明旭 (1988-), 男, 长春理工大学光电工程学院讲师, 硕士生导师, 2015 年于长春理工大学获得博士学位, 主要从事成像衍射光学技术及应用、非常规光学系统设计方面的研究。Email: piaomingxu123@126.com