

激光/红外双模环形孔径导引头光学系统设计

谢亚峰¹, 朴明旭^{2*}, 唐金力¹, 赵渊明¹, 连文泽¹, 范杰平¹, 张 博²

1. 中国电子科技集团公司第二十七研究所, 河南 郑州 450047;
2. 长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 为了实现激光/红外双模导引头成像系统的小型化, 简化光学系统结构, 设计了四次反射的双模共光路环形孔径超薄成像系统, 研究了该系统的分光路设计原理, 给出了遮拦比与视场角的关系, 实现了仅有单一光学元件的长波红外 7.7~9.5 μm 和激光 1.064 μm 双模导引头成像系统。双模环形孔径系统在长波红外波段的焦距为 70 mm、等效 F 数为 1.3、全视场为 8°、空间频率为 41.7 lp/mm 时各视场 MTF 值均大于 0.136。双模环形孔径系统在激光波长的焦距为 53.8 mm、等效 F 数为 1、全视场为 10°、全视场范围内的光斑分布均匀。在环境温度范围为 -40~80 $^{\circ}\text{C}$ 时, 长波红外波段各视场 MTF 值均大于 0.13, 激光波长的弥散斑形状和能量分布基本不变, 实现了光学被动无热化。通过公差分析可知双模环形孔径系统具备可加工性。

关键词: 光学设计; 双模导引头成像系统; 环形孔径; 非球面

中图分类号: O435 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20220442

Optical system design of laser/infrared dual-mode annular aperture seeker

Xie Yafeng¹, Piao Mingxu^{2*}, Tang Jinli¹, Zhao Yuanming¹, Lian Wenzhe¹, Fan Jieping¹, Zhang Bo²

1. The 27th Research Institute of China Electronic Technology Group Corporation, Zhengzhou 450047, China;
2. School of Opto-electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to realize the miniaturization of the laser/infrared dual-mode seeker imaging system and simplify the optical structure, a dual-mode common optical path annular aperture ultrathin imaging system with four reflections is designed. The design principle of the optical splitting path of the system is studied, and the relationship between the obscuration ratio and the field of view is given. The long-wave infrared (LWIR) 7.7-9.5 μm and laser 1.064 μm dual-mode seeker imaging system is realized by a single optical element. The focal length of the dual-mode annular aperture system in the LWIR is 70 mm, the equivalent F number is 1.3, and the full field of view is 8°. The modulation transfer function (MTF) values of each field of views are greater than 0.136 when the spatial frequency is 41.7 lp/mm. The focal length of the dual-mode annular aperture system at the laser wavelength is 53.8 mm, the equivalent F number is 1, the full field of view is 10°, and the spot diagram in the full field of view is uniform. When the ambient temperature ranges from -40 $^{\circ}\text{C}$ to 80 $^{\circ}\text{C}$, the MTF value of each field of view is greater than 0.13 in the LWIR, and the energy distribution is basically unchanged in laser

收稿日期: 2022-06-27; 修订日期: 2022-09-03

基金项目: 国家自然科学基金 (62105041); 吉林省教育厅项目 (JKH20220741KJ, JJKH20220748KJ)

作者简介: 谢亚峰, 男, 高级工程师, 博士, 主要从事激光制导和激光雷达方面的研究。

通讯作者: 朴明旭, 男, 副教授, 博士, 主要从事现代光学系统设计方面的研究。

wavelength. As a result, the optical passive athermalization is realized. According to the tolerance results, this system is machinable.

Key words: optical design; dual-mode seeker imaging system; annular aperture; aspheric

0 引言

信息化条件下的战争,使精确制导武器成为实施毁灭性打击的重要手段。精确制导武器的打击精度主要依赖导引头的制导技术。随着精确制导武器的对抗层次越来越多,对抗手段越来越复杂,在现代战场环境中,单一模式的制导很难满足精确打击的需要,所以多模复合制导光学系统得到了飞速发展。红外/激光双模复合制导技术是世界各国研究的重点,它能实现光电互补,从而克服各自的不足,又综合利用了二者的优点。红外成像系统主要用于探测场景,排除各种轻重诱饵的干扰,识别出欲拦截目标。激光雷达发射激光束照亮所选目标,反射回的激光会聚到探测器上以提取频谱幅度、相位等多种信息。将这两种传感器提供的多种信息经过信息融合处理可准确识别目标。目前的红外/激光双模导引头光学系统均采用卡塞格林反射镜作为共口径,通过分光平板^[1]或次镜^[2]将红外成像光路和激光探测光路分开,再经过多个折射透镜聚焦,提高成像质量。然而,现有红外/激光双模导引头成像光路中采用反射、透射、分光等多个光学元件,无法减少系统质量和体积,进而无法实现导引头小型化。

环形孔径超薄成像光学系统由反射式望远镜扩展得到,通过对光路的修改实现多次折叠反射,从而显著缩短系统轴向尺寸。美国的 Tremblay 等设计了可见光波段的八次反射、四次反射成像系统^[3-5],还研究了波前编码拓展焦深范围的方法^[6],为环形孔径成像系统的研究奠定了基础。为了提高复色波段的成像质量,将环形孔径超薄成像系统与衍射光学元件^[7-9]、液体透镜^[10]、补偿镜组^[11-12]进行结合,消除了色差对成像质量的影响。然而,上述研究只能用于单波段成像系统中,无法满足双波段成像要求。对于双波段成像, Du Ke 等^[13]和王琦等^[14]分别设计了反射式和折射式环形孔径超薄成像系统,在中长波红外双波段实现了高质量成像。然而,上述双波段环形孔径超薄成像系统仅针对共焦面设计,无法适用于激光/红外双模制导系统的分离探测器成像要求。

为了实现激光/长波红外双模导引头成像系统的小型化,文中研究了环形孔径超薄成像系统的分光路设计原理,通过分析遮拦比与视场角的关系,设计了仅有单一光学元件的长波红外 7.7~9.5 μm 和激光 1.064 μm 双模导引头成像系统。长波红外探测器和激光探测器分别位于环形孔径超薄成像系统的两侧,且沿光轴排列。长波红外波段光束通过三次环带反射面反射后,由中心圆形分光面折射出射,并聚焦到长波红外探测器。激光波长成像光束通过三次环带反射和分光面反射后,经圆形折射面出射,并聚焦到激光探测器。通过对激光/长波红外双模共光路环形孔径超薄成像系统的像质分析和温度分析,验证了系统的成像质量和环境适用性。

1 双模共光路环形孔径超薄成像系统的设计原理

环形孔径超薄成像系统仅由单块光学材料构成,超薄透镜的两个表面均为环带非球面反射面,在不同的环带反射区域有不同的面型。成像光束通过超薄透镜的外环通光口径进入光学系统,经过一系列同心圆环反射区域后进入位于透镜中心的探测器进行成像。激光/长波红外双模环形孔径超薄成像系统的原理如图 1 所示,两个不同焦距的光学系统共用一个通光口径分别成像在各自的探测器上。图 1 中红色成像光束是激光成像波段,蓝色成像光束是长波红外波段。激光/长波红外双模成像系统的近轴折射式光路如图 1(a) 所示,在其中引入多个反射镜对两个波段光路进行多次折叠,通过分光面分离长波红外和激光波段成像光路,可以显著减小系统的轴向尺寸,如图 1(b) 所示。环形孔径超薄成像系统的轴向尺寸 t 由公式 (1) 计算得到:

$$t = \frac{f' \cdot n_s}{R_{number}} \quad (1)$$

式中: f' 为系统焦距; n_s 为环形孔径超薄成像系统的基底材料折射率; R_{number} 为反射次数。激光/长波红外双模环形孔径超薄成像系统在两个波段具有不同焦距,

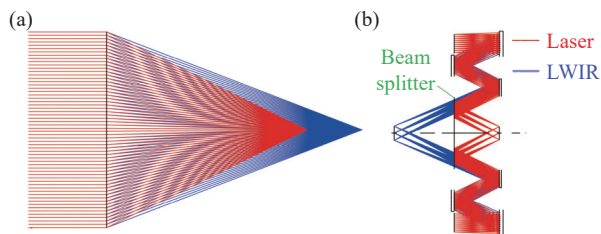


图 1 激光/长波红外双模环形孔径超薄系统成像原理图。(a) 双模近轴折射式结构; (b) 双模近轴环形孔径反射式结构

Fig.1 Imaging principle of laser/long-wave infrared dual-mode annular aperture ultrathin system. (a) Dual-mode paraxial refraction structure; (b) Dual-mode paraxial annular aperture reflective structure

为了减小系统的轴向尺寸,采用焦距较小的波段计算环形孔径超薄成像系统的厚度。从公式(1)可以看出,当系统焦距和基底材料选定时,随着反射次数的增加,系统轴向尺寸越小,但系统的外径和体积将明显增加^[15]。综合考虑系统轴向尺寸和外径,选择四次反射的环形孔径超薄成像结构。

从图1(b)可以看出,由于成像光路多次折叠反射,系统中心区域将拦截成像光束,外部环带区域成像光束通过系统成像。中心遮拦区域的大小用 α_{obs} 表示,其表达式为:

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

式中: d 为中心遮拦区域直径; D 为环形孔径超薄成像系统的外径直径。为了保证各视场范围内的成像光束通过多个环带反射面反射后到达探测器,且不引起渐晕,四次反射的环形孔径超薄成像系统中心遮拦与视场的关系如下式:

$$\alpha_{obs} = \frac{3}{4} + \frac{7f' \tan(\omega)}{8D} \quad (3)$$

式中: ω 为环形孔径超薄成像系统的半视场角。将公式(2)代入公式(3),化简后得到:

$$d = \frac{3D}{4} + \frac{7f' \tan(\omega)}{8} \quad (4)$$

由公式(4)可以看出,当环形孔径超薄成像系统的外径直径 D 一定时,随着视场角的增大,中心遮拦区域直径 d 将增大,进入系统参与成像的光束范围减小,因此系统的光能收集率减小。为了增大环带通光区域面积,可以增加系统的外径直径 D ,但会引起系统质量和尺寸增加。对比环形孔径超薄光学系统和

传统折射式光学系统的光能收集率,通过面积公式求出与环形通光区域面积相等的圆形有效孔径,其表达式为:

$$D_{eff} = D \sqrt{1 - \alpha_{obs}^2} \quad (5)$$

式中: D_{eff} 为圆形有效孔径尺寸。当环形孔径超薄成像系统的焦距已知时,可以得到环形孔径超薄成像系统的等效 F 数 F_{eff} ,其表达式为:

$$F_{eff} = \frac{f'}{D_{eff}} \quad (6)$$

由于激光/长波红外双模导引头成像系统中,长波红外波段探测器为非制冷探测器,因此在设计双模环形孔径超薄成像系统时,圆形有效孔径 D_{eff} 由长波红外波段确定。中心遮拦区域直径 d 的尺寸需要考虑激光和长波红外波段的视场角,进而确定环形孔径超薄成像系统的外径尺寸 D 。

2 激光/长波红外双模共光路环形孔径超薄成像系统的设计和分析

2.1 双模共光路环形孔径超薄成像系统的设计

设计了应用于长波红外 7.7~9.5 μm 和激光 1.064 μm 的双模导引头成像系统,该系统的设计指标参数如表 1 所示。对于超薄成像系统的基底材料,不仅需要两个波段的透过率,还要考虑材料的光学特性和加工特性。选择红外硫系玻璃 IRG206^[16] 作为双模环形孔径超薄成像系统的基底材料,这种材料可以通过精密模压实现批量化加工。

表 1 激光/长波红外双模环形孔径超薄成像系统的设计指标

Tab.1 Design index of laser/LWIR dual-mode annular aperture ultrathin imaging system

Parameter	Value	
	LWIR	Laser
Effective focal length/mm	70	53.8
Effective entrance aperture/mm	53.8	53.8
Effective $F\#$	1.3	1.0
Wavelength/ μm	7.7-9.5	1.064
Field of view/(°)	8	10
Detector/mm	7.68×6.144	Φ 10
Length of system/mm	\leq 32	\leq 32

由表 1 可知, 激光波长和长波红外波段系统的焦距不同, 选择激光系统的焦距代入公式 (1) 计算环形孔径光路的长度, 反射次数 R_{number} 为四次。长波红外系统的等效 F 数为 1.3, 等效口径为 53.8 mm。根据公式 (5) 得到环形孔径超薄成像系统的遮拦比 α_{obs} 与外径直径 D 的关系如图 2 所示。

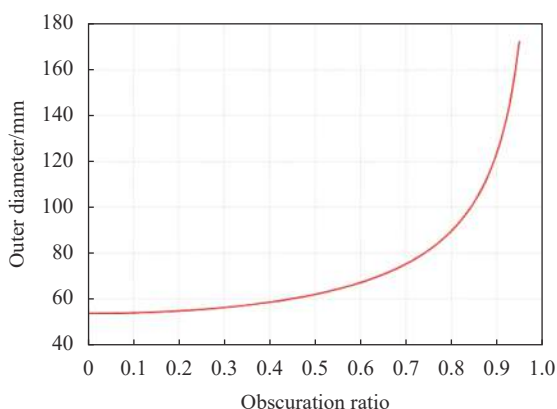


图 2 环形孔径超薄成像系统的遮拦比与外径口径的关系

Fig.2 Relationship between the obscuration ratio and the outer diameter of the annular aperture ultrathin imaging system

从图 2 可以看出, 当遮拦比大于 0.7 时, 环形孔径超薄成像系统的外径直径迅速增加, 导致系统的质量和体积增大。当遮拦比小于 0.7 时, 随着视场角度的增加, 环形孔径超薄成像系统的轴外部分光线会被第二个环带反射面遮挡, 导致实际进入系统的等效通光口径无法满足要求。因此, 初始结构选择遮拦比为 0.7, 结合长波红外波段的焦距和视场角, 根据公式 (3) 得到初始外径直径为 86 mm, 中心遮拦区域直径为 60.2 mm。基于上述参数计算结果, 搭建双模近轴环形孔径反射式结构, 再将各反射面之间的空气替换成基底材料 IRG206, 并优化环带反射面的半径, 保证红外波段和激光波段的系统焦距和轴向尺寸。为了校正系统单色像差, 提高成像质量, 将各环带透射面和环带反射面的面型设置为偶次非球面^[17], 其表达式为:

$$z = \frac{cr^2}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2r^2}} + \sum_{i=1}^8 a_i r^{2i} \quad (7)$$

式中: z 为偶次非球面的矢高; c 为曲率; k 为圆锥系数; r 为径向高度。

通过优化各环带面型参数并控制系统总长和口径, 得到设计结果如图 3 所示。系统的外径直径为

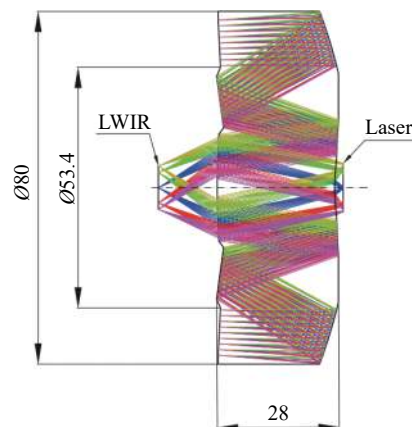


图 3 激光/长波红外双模环形孔径超薄成像系统的光路图

Fig.3 Layout of laser/LWIR dual-mode annular aperture ultrathin imaging system

80 mm, 遮拦区域直径为 53.4 mm, 遮拦比为 0.67。经过分光面后系统左侧为长波红外波段, 系统右侧为激光波段, 双模环形孔径超薄成像系统的轴向尺寸为 28 mm, 远远小于目前常用的卡式双模导引头成像系统尺寸。激光/长波红外双模环形孔径超薄成像系统的实体结构如图 4 所示。图 4(a) 中, 黄色透明区域表示折射透光环带, 银白色区域表示反射环带, 粉色区域表示分光面。图 4(b) 中, 银白色区域表示反射环带, 黄色透明区域表示折射透光环带。

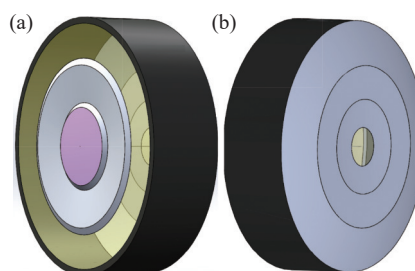


图 4 激光/长波红外双模环形孔径超薄系统成像实体结构。(a) 前表面; (b) 后表面

Fig.4 Exploded solid model of laser/LWIR dual-mode annular aperture ultrathin imaging system. (a) Front view; (b) Rear view

双模环形孔径超薄成像系统优化后, 在长波红外波段的 MTF 曲线如图 5 所示, 各视场的 MTF 值如表 2 所示。在奈奎斯特频率^[18]41.7 lp/mm 时, 各视场的 MTF 曲线接近衍射极限, 边缘视场的 MTF 最小值为 0.136, 实现了高质量成像。

双模环形孔径超薄成像系统在激光波段的点列图如图 6 所示, 各视场的弥散斑均方根 (RMS) 半径值

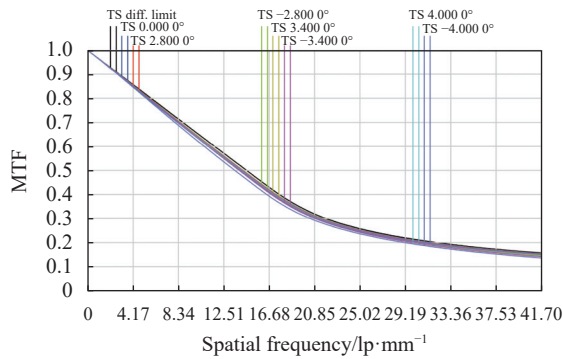


图 5 双模环形孔径超薄成像系统在长波红外波段的 MTF 曲线

Fig.5 MTF curves of dual-mode annular aperture ultrathin system imaging in LWIR

表 2 双模环形孔径超薄成像系统在长波红外波段的 MTF 值

Tab.2 MTF values of dual-mode annular aperture ultrathin system imaging in LWIR

Field of view/(°)	Directions	
	Tangential	Sagittal
0	0.154	0.154
2.8	0.146	0.154
4	0.136	0.150

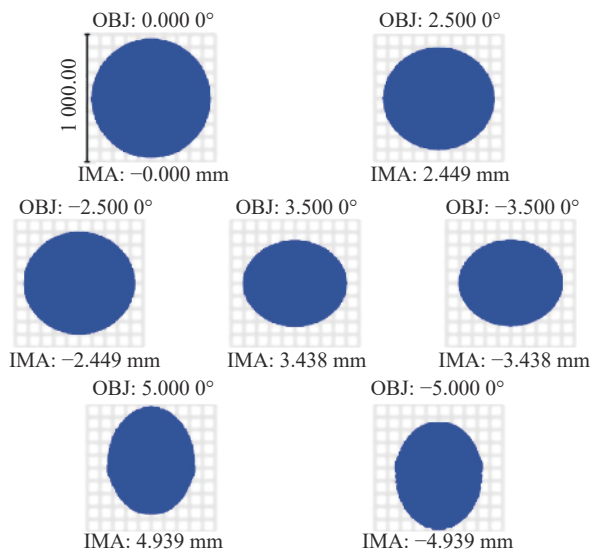


图 6 双模环形孔径超薄成像系统在激光波长的弥散斑

Fig.6 Spot diagram of dual-mode annular aperture ultrathin imaging system at laser wavelength

如表 3 所示。从图 6 可以看出,全视场范围内的光斑分布均匀,光斑弥散斑 RMS 最大值为 280 μm,最小值为 204 μm,0.7 视场范围内的光斑一致性大于 80%。

表 3 双模环形孔径超薄成像系统在激光波长的弥散斑 RMS 值

Tab.3 Spot RMS values of dual-mode annular aperture ultrathin imaging system at laser wavelength

Field of view/(°)	RMS radius/μm
0	2800.154
2.5	2520.154
3.5	225
5	2040.150

2.2 双模共光路环形孔径超薄成像系统的无热化分析

由于导引头光学系统的环境温度随时变化,导致光学系统产生热离焦,影响不同环境温度下的成像质量。实现光学系统无热化的方法主要有光学被动无热化、机械被动无热化和电子主动无热化等,其中光学被动无热化采用不同热特性的光学元件材料和光机结构材料进行匹配设计,在不移动任何一个或者任何一组透镜元件的情况下,保持整个系统在不同环境温度下像面的稳定,进而简化系统结构,实现系统轻量化^[19-20]。环形孔径超薄成像系统区别于传统折射式或折反射式光学系统,仅由单一光学元件组成。因此,通过分析不同基底材料在两个波段的温度特性,并通过分配各环带反射面的光焦度,在-40~80℃宽温度范围内进行光学无热化设计。硫系玻璃 IRG206 的线膨胀系数为 $20.7 \times 10^{-6}/K$,在 8 μm 波段的折射率温度系数为 $32 \times 10^{-6}/°C$ 。长波红外波段的镜筒材料选择钛合金,激光波段的镜筒材料选择铝合金。当环境温度范围窄时,长波红外波段的镜筒材料同样可以选择铝合金。双模共光路环形孔径超薄成像系统在-40℃,20℃和80℃的长波红外波段的 MTF 曲线如图 7 所示,激光波段的弥散斑分布如图 8 所示。不同环境温度对应各视场的 MTF 最小值和弥散斑 RMS 值分别如表 4 和表 5 所示。

从图 7 和表 4 可以看出,在-40~80℃范围内,双模环形孔径超薄成像系统在长波红外波段的 MTF 曲线基本不变,各视场 MTF 最小值大于 0.13。从图 8 和表 5 可以看出,双模环形孔径超薄成像系统在激光波长的弥散斑形状和能量分布基本没有变化,各温度下的 0.7 视场范围内的光斑一致性大于 80%,实现了光学被动无热化。

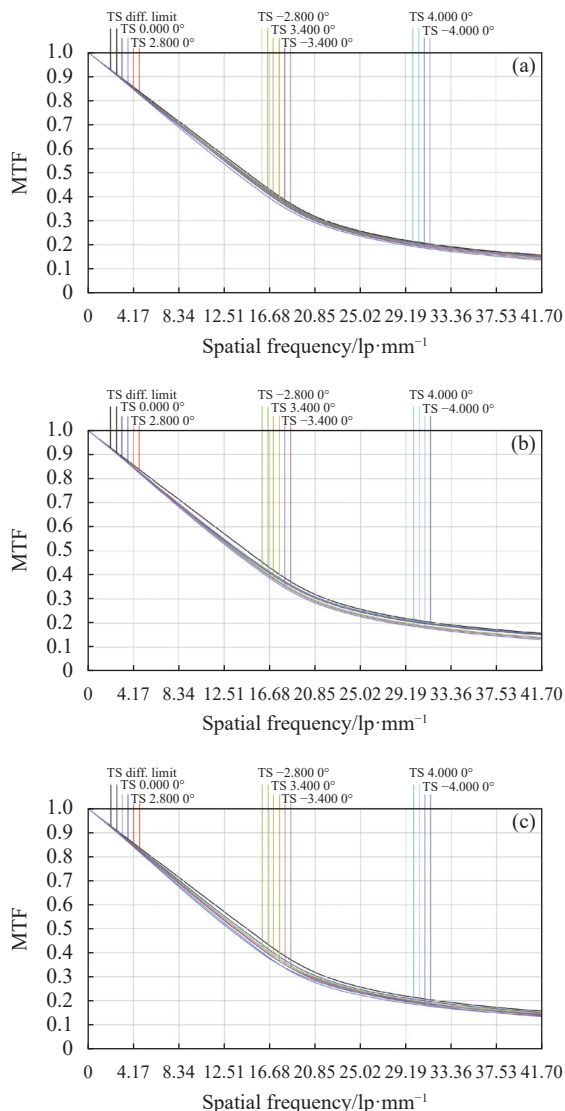


图 7 不同环境温度下双模环形孔径超薄系统成像在长波红外波段的 MTF。(a) 20 °C; (b) -40 °C; (c) 80 °C

Fig.7 MTF of dual-mode annular aperture ultrathin system imaging in LWIR at different ambient temperatures. (a) 20 °C; (b) -40 °C; (c) 80 °C

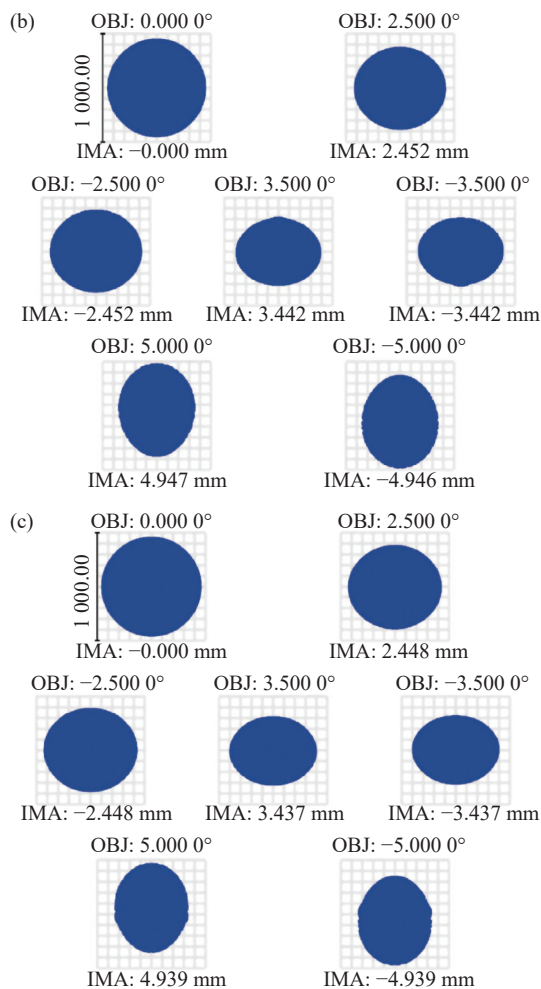
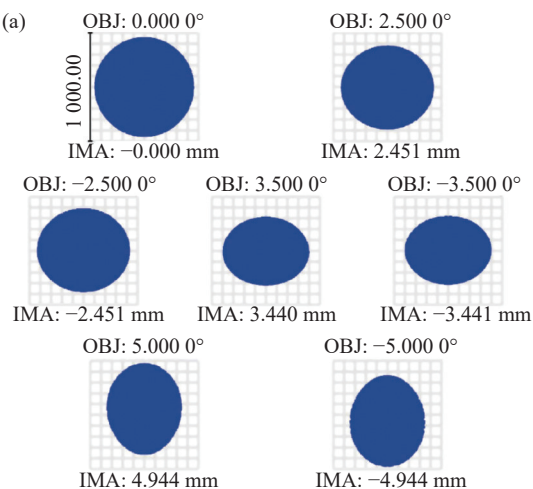


图 8 不同环境温度下双模环形孔径超薄成像系统在激光波长的点列图。(a) 20 °C; (b) -40 °C; (c) 80 °C

Fig.8 Spot diagram of dual-mode annular aperture ultrathin system imaging in laser waveband at different ambient temperatures. (a) 20 °C; (b) -40 °C; (c) 80 °C

表 4 不同环境温度下双模环形孔径超薄成像系统在长波红外波段的 MTF 值

Tab.4 MTF values of dual-mode annular aperture ultrathin imaging system in LWIR at different ambient temperatures

Field of view/(°)	20 °C		-40 °C		80 °C	
	Tangential	Sagittal	Tangential	Sagittal	Tangential	Sagittal
0	0.154	0.154	0.150	0.150	0.151	0.151
2.8	0.146	0.154	0.140	0.152	0.144	0.147
4	0.136	0.149	0.130	0.153	0.134	0.136

表 5 不同环境温度下双模环形孔径超薄成像系统在激光波长的弥散斑 RMS 值

Tab.5 Spot values of dual-mode annular aperture ultrathin imaging system at laser wavelength and different ambient temperatures

Field of view/(°)	RMS radius/ μm		
	20 °C		
	-40 °C	80 °C	
0	280	287	289
	0.154	0.154	0.154
2.5	252	258	256
	0.154	0.154	0.154
3.5	225	230	231
5	204	208	207
	0.150	0.150	0.150

2.3 双模共光路环形孔径超薄成像系统的公差分析

由于双模共光路环形孔径超薄成像系统的两侧环带反射面加工在同一个基底材料,元件的加工误差将直接影响成像质量。双模共光路环形孔径超薄成像系统的公差类型包括各环带面之间的间隔、每个环带面的偏心和倾斜、环带非球面面型误差,以及整个元件的偏心和倾斜误差,对这些公差进行灵敏度分析,并采用元件与探测器之间的间隔作为公差补偿,系统的公差设置如表 6 所示。

表 6 双模共光路环形孔径超薄成像系统的公差

Tab.6 Tolerance of the dual-mode annular aperture ultrathin imaging system

Tolerance	Parameter
Thickness/mm	± 0.02
Element decenter/mm	± 0.02
Element tilt/(°)	± 1
Surface decenter/mm	± 0.01
Surface tilt/(°)	± 0.7
Aspheric PV value/ μm	± 0.2
Test wavelength/nm	632.8

由于该系统的长波红外波段成像,根据表 6 的公差分析长波红外的影响。系统以 MTF 作为评价成像质量的标准,得到分析结果如表 7 所示。

从表 7 可以看出,在空间频率为 41.7 lp/mm 时,考虑公差后的各视场子午方向 MTF 值大于 0.101,弧矢方向 MTF 值大于 0.111。公差分析结果说明双模环形孔径超薄成像系统具备可加工性。

表 7 双模环形孔径超薄成像系统在长波红外波段的公差分析结果

Tab.7 Tolerance results of dual-mode annular aperture ultrathin system imaging in LWIR

Field of view/(°)	Tangential		Sagittal	
	Nominal	Estimated	Nominal	Estimated
0	0.154	0.122	0.154	0.122
2.8	0.146	0.105	0.154	0.132
4	0.136	0.101	0.150	0.111

3 结 论

文中设计了一种适用于激光和长波红外波段的双模共光路环形孔径超薄成像光学系统,给出了双模环形孔径系统的设计方法。根据设计指标,完成了系统初始结构参数的计算,通过环带非球面的优化,实现了长波红外 7.7~9.5 μm 和激光 1.064 μm 的双模环形孔径超薄导引头成像系统,该系统的外径直径为 80 mm,轴向尺寸为 28 mm。在长波红外波段,空间频率为 41.7 lp/mm 时各视场 MTF 曲线接近衍射极限,MTF 大于 0.136。在激光波长、系统全视场范围内的光斑分布均匀,光斑弥散斑 RMS 最大值为 280 μm 。对双模环形空间超薄成像系统进行了无热化设计,在 -40~80 °C 范围内,长波红外波段的 MTF 曲线基本不变,各视场 MTF 最小值均大于 0.13,激光波长的弥散斑形状和能量分布基本没有变化。考虑公差后,该系统在全视场范围内的 MTF 大于 0.1,具备可加工性。设计结果对未来低成本、小型化激光/长波红外双模导引头成像系统的实现提供了新思路。

参考文献:

[1] Yin Xiaochen, Fu Yanhui. Optical design of common aperture IR/Ladar dual-mode imaging seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(2): 428-431. (in Chinese)

[2] Zuo Baojun, Kuang Yaowu. Optical design of IR/Ladar dual-mode seeker [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(3): 495-499. (in Chinese)

[3] 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.

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

- [5] Tremblay E J, Stamenov I, Beer R D, et al. Switchable telescopic contact lens [J]. *Optics Express*, 2013, 21(13): 15980-15986.
- [6] Tremblay E J, Rutkowski J, Tamayo I, et al. Relaxing the alignment and fabrication tolerances of thin annular folded imaging systems using wavefront coding [J]. *Applied Optics*, 2007, 46(27): 6751-6758.
- [7] 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)
- [8] Zhang Bo, Piao Mingxu, Cui Qingfeng. Achromatic annular folded lens with reflective-diffractive optics [J]. *Optics Express*, 2019, 27(22): 32337-32348.
- [9] 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)
- [10] Li L, Wang D, Liu C, et al. Ultrathin zoom telescopic objective [J]. *Optics Express*, 2016, 24(16): 18674-18684.
- [11] Zhang Ruirui, Shen Weimin. Long focal-length optical system using annular aperture [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(4): 1140-1143. (in Chinese)
- [12] 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.
- [13] Du Ke, Cheng Xuemin, Lv Qichao, et al. Design of an ultra-thin dual band infrared system [C]//Proceedings of SPIE, 2014, 9272: 92720U.
- [14] Wang Qi, Piao Mingxu, Meng Yutong, et al. Design of infrared dual-band common path annular aperture ultrathin imaging system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(3): 20200270. (in Chinese)
- [15] Piao Mingxu, Zhang Bo, Dong Keyan. Design of achromatic annular folded lens with multilayer diffractive optics for the visible and near-IR wavebands [J]. *Optics Express*, 2020, 28(20): 29076-29085.
- [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)
- [17] Pan Junhua. The Design Manufacture and Test of the Aspherical Optical Surfaces [M]. Suzhou: Soochow University Press, 2004. (in Chinese)
- [18] Smith W J. Modern Optical Engineering [M]. 4th ed. Zhou Haixian, Cheng Yunfang, translated. Beijing: Chemical Industry Press, 2011. (in Chinese)
- [19] Gao Xudong, Cui Qingfeng, Zheng Hanqing, et al. Athermalization design of deep ultraviolet optical system with temperature range [J]. *Acta Optica Sinica*, 2020, 40(17): 1722001. (in Chinese)
- [20] Lim T, Park S. Achromatic and athermal lens design by redistributing the element powers on an athermal glass map [J]. *Optics Express*, 2016, 24(16): 18049-18058.