

文章编号 1004-924X(2016)02-0268-10

共孔径消热差红外双波段光学系统

白瑜^{1,2,3*}, 廖志远¹, 廖胜¹, 任栖峰¹, 陈为¹, 林妩媚¹, 邢廷文¹, 蒋亚东²

(1. 中国科学院光电技术研究所, 四川成都 610209;

2. 电子科技大学光电信息学院, 四川成都 610054; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 设计了适用于制冷型 320×256 中波红外凝视焦平面阵列探测器和 320×256 长波红外凝视焦平面阵列探测器的共孔径消热差折反射式红外双波段光学系统。该系统在中波 $3.7 \sim 4.8 \mu\text{m}$, 长波 $7.7 \sim 11.7 \mu\text{m}$, 环境温度 $10 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$ 下工作, 其焦距为 292 mm , 视场角为 $1.56^\circ \times 1.875^\circ$, $F/\#$ 为 1.93 , 满足 100% 冷光阑效率。设计的系统共用主镜、次镜和准直镜组, 利用分光镜实现中波红外、长波红外光谱分光, 后接各自的校正镜组校正剩余像差。给出了设计原理、设计过程和工程设计时需考虑的一些因素, 通过选择合适的光学材料、机械材料和分配光焦度, 实现了两路系统在 $10 \sim 40 \text{ }^\circ\text{C}$ 环境温度下具有良好的成像性能。该系统成像质量好、可加工性好、装配难度小、工程可实施性强。

关键词: 光学设计; 红外光学系统; 双波段成像系统; 共孔径结构

中图分类号: TN216 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162402.0268

Infrared dual band athermal optical system with common aperture

BAI Yu^{1,2,3*}, LIAO Zhi-yuan¹, LIAO Sheng¹, REN Qi-feng¹,
CHEN Wei¹, LIN Wu-mei¹, XING Ting-wen¹, JIANG Ya-dong²

(1. *Institute of Optics and Electronics, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209, China;*

2. *School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and
Technology of China, Chengdu 610054, China;*

3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

* *Corresponding author, E-mail: baiyu91258@163.com*

Abstract: A set of common aperture athermal catadioptric optical system with infrared dual bands is presented for 320×256 MWIR and LWIR staring focal plane array detectors. The system works at the wavelength of $3.7\text{--}4.8 \mu\text{m}$, $7.7\text{--}11.7 \mu\text{m}$, and the environment temperature of $10\text{--}40 \text{ }^\circ\text{C}$. Its working parameters are the effective focal length of 292 mm , field of view of $1.56^\circ \times 1.875^\circ$, $F/\#$ of 1.93 and the cold shield efficiency of 100% . The LWIR system shares the primary mirror, secondary mirror and collimating lens with the MWIR system. The beam splitting of the MWIR and LWIR is achieved by a spectroscopy and their aberrations are eliminated by correcting lenses respectively. The design principle, design process and some considering factors in engineering design moment are presented. By choosing appropriate optical materials, mechanical materials and assigning the optical power, the common aperture athermal catadioptric optical system obtains good image

收稿日期: 2015-09-30; 修订日期: 2015-12-04.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 10874181); 中国科学院青年创新促进会资助项目

quality during 10 °C to 40 °C. It shows good imaging quality, good machining ability, easy to be assemble, and suitable for engineering applications.

Key words: optical design; infrared optical system; dual band imaging system; common aperture

1 引言

在各种成像系统中,红外成像系统具有被动探测、探测精度高、虚警率低、抗电磁干扰性强、可实现全天候探测识别等优势^[1],因此在红外警戒、目标识别等光电仪器设备中得到了广泛的应用。由于大气对目标在不同红外波段的辐射影响不同,所以红外成像系统在不同环境的探测识别能力也不同,如在长波红外波段、杂散辐射或热源辐射的环境,或在中波红外波段、潮湿低热的环境中,系统的探测识别能力更强。利用中波红外/长波红外双波段复合探测的系统可有效提高探测识别目标的准确度,实现全天候、高分辨率、复杂环境下目标的探测,因此红外双波段成像系统成为国内外该领域的研究热点^[2-14]。

红外双波段成像系统主要有分孔径式结构、共孔径式结构和一体式共光路结构三种形式。分孔径式结构是利用两个单独不同的光路分别探测不同波段的红外辐射,将其会聚传递到不同的单色红外探测器上,这种结构是单波段系统简单的拼凑,两个光路不相互制约,设计的自由度大、实现难度小,但该系统质量大、体积大,一般不适合对质量和空间等要求苛刻的条件下使用。共孔径式结构是利用部分共光路的形式采用二色分光镜将不同波段的红外辐射分开,经过各自的校正光路,最后将不同波段的红外辐射会聚到不同的单色红外探测器上。该结构的特点主要有三方面:首先,共光路部分对两个光路后面校正光路的约束,要合理平衡共光路部分在两个波段处的像差;其次,二色分光镜在共孔径系统中的位置很关键,直接决定着光学系统的设计难度。对于反射支路,二色分光镜不会影响其成像性能,但对于透射支路,由于二色分光镜会引入球差、像散等像差,则增大了像差校正的难度;再次,对于有环境适应性要求的共孔径式系统,共光路部分大大减少了温度适应性调节时的优化自由度。一体式共光路结构是利用同一个光路收集红外辐射,应用双色

红外探测器同时接收两个波段的红外辐射,该结构要求光学材料可同时透过两个波段,可选光学材料很少,优化设计的自由度太小,且必须平衡两个波段的像差。

本文提出了一种共用光路部分为反射镜和透镜相结合的共孔径式红外成像系统。首先给出了系统的实现原理,分析了系统的像差特点,并设计了一套中波红外/长波红外双波段消热差光学系统。该系统的成像质量良好、可加工性好、装配难度小、工程可实施性强,具有很好的应用前景。

2 系统指标及设计原理

2.1 主要技术指标

根据红外双波段相机的要求,共孔径消热差红外双波段光学系统的主要技术指标如下:

- (1) 工作波段:中长波复合,中波为 3.7~4.8 μm ,长波为 7.7~11.7 μm ;
- (2) 焦距:中波、长波均为 292 mm;
- (3) F 数:1.93;
- (4) 视场:中波、长波均为 $1.56^\circ \times 1.875^\circ$;
- (5) 入瞳直径:151.29 mm;
- (6) 红外探测器:长波阵列为 320 pixel \times 256 pixel,像元尺寸为 30 $\mu\text{m} \times$ 30 μm ,长波红外探测器的窗口为 1 mm 的锗镜,滤光片为 0.3 mm 的锗镜,冷光阑到靶面的距离为 19.8 mm;中波阵列为 320 pixel \times 256 pixel,像元尺寸为 30 $\mu\text{m} \times$ 30 μm ,中波红外探测器的窗口为 1 mm 的硅镜,滤光片为 0.3 mm 的锗镜,冷光阑到靶面的距离为 19.8 mm;
- (7) 像质要求:中波系统 1 个像元的能量集中度大于 60%;长波系统 1 个像元的能量集中度大于 45%;
- (8) 遮拦比:小于 0.3;
- (9) 畸变:小于 2%;
- (10) 系统整体外形尺寸:小于 320 mm \times 200 mm \times 180 mm(长 \times 宽 \times 高);

- (11) 冷光阑效率: 100%;
 (12) 环境温度: 10~40 °C;

2.2 设计原理及过程

共孔径消热差红外双波段光学系统的组成示意图如图 1 所示。

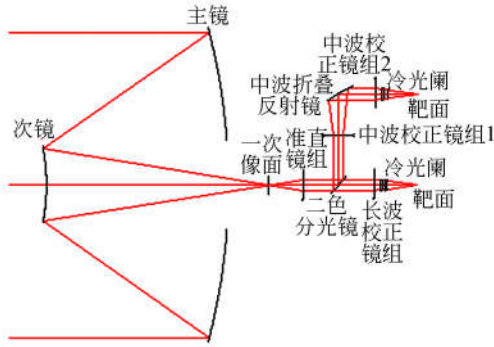


图 1 共孔径消热差双波段红外光学系统的组成示意图
 Fig. 1 Schematic of common aperture athermal infrared optical system with dual band

考虑红外双波段相机的焦距较长, 大口径透射光学材料的成本高, 以及系统整机尺寸的轻量化、小型化的需求, 这里选用折反射光学结构作为该系统的基准结构。共孔径消热差红外双波段光学系统共用主镜、次镜和准直镜组。即使没有准直镜组也可以实现共孔径消热差红外双波段, 但由于光线经主、次镜会聚后才进行光谱分光, 此时分光镜在长波支路是处于发散光路中, 一方面分光镜引入的像差更不好校正, 另一方面对分光镜的装配要求更高。通过在二色分光镜上镀分光膜实现透射长波红外波段, 反射中波红外波段的光谱分光, 主光路为长波红外探测系统, 折转光路为中波红外探测系统。长波红外探测系统使用了一组校正镜组, 中波红外探测系统因要进行光路折转, 故使用了两组校正镜组。

系统的设计过程分为初始结构计算和像差优化两个阶段。在初始结构计算阶段要把系统中的透镜简化为理想的薄透镜, 然后根据系统要求的焦距、F 数、靶面大小、整体外形尺寸来初步确定系统中各个光学元件的焦距和它们之间的间距。对于有环境温度约束的系统, 各个光学元件的参数除需满足光焦度和系统整体外形尺寸的要求外, 还需满足消热差的要求^[15]。本文建立了整体外形尺寸要求、光焦度要求、消色差和消热差的方

程组, 如式(1)~式(8)所示, 从而求解得到系统的初始结构。

$$OAL_{l_{\text{wir}_d}} \leq L, \quad (1)$$

$$D_1 \leq H, \quad (2)$$

$$OAL_{m_{\text{wir}_d1}} \times (-1) \leq H/2, \quad (3)$$

$$OAL_{m_{\text{wir}_d2}} + OAL_{m_{\text{wir}_d3}} \leq L, \quad (4)$$

$$D_1 \leq W, \quad (5)$$

$$\frac{1}{h_1} \sum_{i=1}^j h_i \phi_i = \phi, \quad (6)$$

$$\left(\frac{1}{h_1 \phi} \right)^2 \sum_{i=1}^j h_i^2 C_i \phi_i = 0, \quad (7)$$

$$\left(\frac{1}{h_1 \phi} \right)^2 \sum_{i=1}^j h_i^2 T_i \phi_i + \alpha_h L = 0, \quad (8)$$

其中: L, W, H 分别为系统的长、宽、高, 考虑到机械方面的尺寸, 计算时的实际输入值应比最终要求的数值小, 以便留出机械设计的余量; $OAL_{l_{\text{wir}_d}}$ 为长波红外探测系统中次镜到靶面的距离; D_1 为主镜的通光直径; $OAL_{m_{\text{wir}_d1}}$ 为中波红外探测系统中分光镜到中波折叠反射镜的距离; $OAL_{m_{\text{wir}_d2}}$ 为中波红外探测系统中次镜到分光镜的距离; $OAL_{m_{\text{wir}_d3}}$ 为中波红外探测系统中折叠反射镜到靶面的距离; ϕ, ϕ_i 分别为系统的总光焦度、第 i 个镜子的光焦度; h_i 为第一近轴光线在第 i 个镜子入射面的高度; C_i, T_i 分别为第 i 个镜子的色差系数和热差系数; α_h 为机械镜筒的线膨胀系数; L 为机械镜筒的长度。

消热差要考虑各个元件的曲率半径、元件厚度、元件间隔、非球面系数、光学材料折射率等参数的影响, 具体的数学模型参考文献[16], 在此不再赘述。为了减小系统的消热差难度, 主镜、次镜的光学材料和主镜、次镜之间的机械材料采用铝合金材料, 其线膨胀系数为 23.5×10^{-6} , 这样温度变化对 R-C 系统的像质基本没有影响。其余机械镜筒的材料也用铝合金。

在像差优化阶段, 要根据各个透镜的实际厚度对搭建的初始结构进行精细的像差优化, 优化时要对系统的整体外形尺寸、光焦度、色差、热差等参数进行约束。该共孔径消热差红外双波段光学系统共用主镜、次镜和准直镜组, 因此需要平衡中波红外波段和长波红外波段在共用光学元件中的像差, 尤其需要考虑色差。由于主镜、次镜组成的反射部分没有色差, 因此重点考虑准直镜组在

中波红外波段和长波红外波段的色差。为了在两个波段内很好地校正准直镜组的色差,两个波段的色差量应相当,因此准直镜组至少要包含两种光学材料。根据经验,能透射中波红外波段和长波红外波段,且能在这两个波段内消色差的材料应选用锗和硒化锌。中波校正镜组和长波校正镜组用于校正各自波段内剩余的像差,并满足热像差、冷屏匹配、校正分光镜引入的像差等要求。为了提高系统的成像质量,通常会引入非球面,一方面更好地平衡系统像差;另一方面简化系统结构,保证系统结构紧凑。

3 设计结果与分析

3.1 设计结果

最终设计的光学系统结构如图2所示。主光路为长波红外探测系统,折转光路为中波红外探测系统。准直镜组采用了两片式结构,它们对系

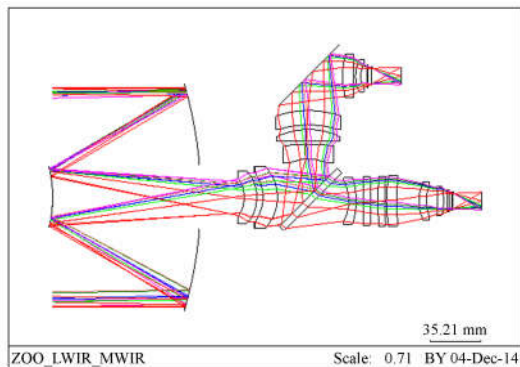


图2 光学系统结构图

Fig. 2 Layout of optical system

统光焦度的贡献分别为负、负,采用硒化锌和锗两种光学材料平衡了准直镜组在长波红外波段和中波红外波段的像差。

由于长波红外探测系统的工作波段为 $7.7\sim 11.7\ \mu\text{m}$,比传统的长波红外系统的工作波段宽很多,因此长波红外探测系统的色差较难校正。同时分光镜在长波红外探测系统为透射作用,会引入像散等像差,从而加剧了长波校正镜组像差校正的难度,再加上还需要校正热差,因此长波校正镜片数稍多。最终通过合理分配光焦度、采用合适的材料、使用非球面等方法共同作用来平衡校正长波校正镜组的像差。长波校正镜组采用了6片式结构,它们对系统光焦度的贡献分别为正、正、负、负、负、负,材料选用了硒化锌和锗两种光学材料,其中1片为滤光片。实际工作时,长波红外探测系统有3个工作模式:波段1为 $7.7\sim 11.7\ \mu\text{m}$,波段2为 $7.7\sim 9.5\ \mu\text{m}$,波段3为 $10.0\sim 11.7\ \mu\text{m}$,根据需求通过切换滤光片来切换波段,因此滤光片应放在尽量平行的光路中,以减小切换时由于位置误差引起的像质变化。中波校正镜组1为三片式结构,它们对系统光焦度的贡献分别为负、正、负,用来校正准直镜组在中波红外波段的残余像差。中波校正镜组2为两片式结构,它们对系统光焦度的贡献分别为负、正,用来校正剩余像差,并满足冷屏匹配,中波红外探测系统采用了硫化锌、锗和硅3种光学材料。由于光学系统为共孔径结构,因此必须保证共用部分量相近,以加快优化设计的进程。表1给出了共孔径红外双波段光学系统中共用部分和各自校正镜组的初级像差,可知共用部分的初级像差相近,各自校正镜组的初级像差也得到了校正。

表1 红外双波段系统的初级像差

Tab. 1 Primary aberrations of IR dual band system

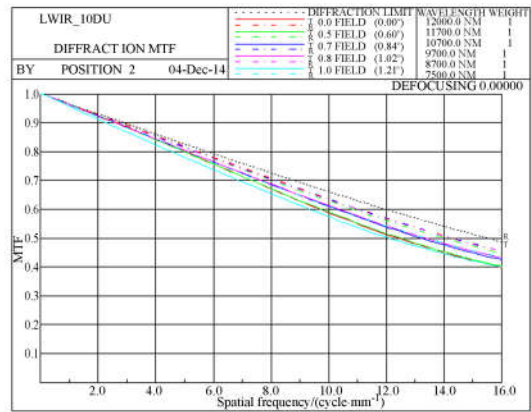
Aberration	LWIR		MWIR	
	Co-optics	LWIR system	Co-optics	MWIR system
SA	0.084 512	-0.018 838	0.084 631	-0.114 423
TCO	0.118 025	-0.047 577	0.118 393	-0.275 286
TAS	0.075 808	0.006 962	0.089 878	-0.139 413
SAS	0.059 140	-0.002 130	0.063 696	-0.070 859
PTB	-0.482 759	-0.059 271	-0.449 501	-0.045 169
DST	0.269 756	0.064 221	0.276 893	-0.063 744
PTZ	0.003 970	-0.010 754	0.002 209	0.005 698
AX	0.025 182	-0.040 226	0.020 651	-0.009 824
LAT	-0.010 312	0.001 354	-0.010 271	0.007 424

为了满足 100%冷光阑效率,并减小系统尺寸,长波红外探测系统和长波红外探测系统都采用了二次成像的结构。通过中波折叠反射镜将中波红外探测系统的靶面转折和长波红外探测系统的靶面平行放置,有利于后续的图像处理,引入中波折叠反射镜同时缩短了系统的纵向尺寸,使得系统的整体结构更加紧凑,最终系统的外形尺寸为 291 mm×171 mm×152 mm(长×宽×高),满足实际使用的安装空间要求。为了提高红外探测系统的成像质量、减小系统尺寸和光学元件数量,在系统中引入了非球面。考虑到加工成本和装配精度的要求,非球面设置在入射角度和出射角度不大的位置,这样可以有效减小设备的装配公差。此外,光阑后置增大了光学系统像差校正的难度,因此在各自的校正镜组中靠近像面的透镜选用非球面,从而更有效地校正像差。目前,虽然可以在一个透镜的两个表面加工非球面,但是两个表面都为非球面会使该元件的偏心公差更敏感,装配时无法准确找到元件光轴。为了有效降低元件的偏心公差,保证加工和装配的精度,这里只在光学元件的一个表面使用了非球面,更容易满足工程精度并确保系统的成像质量。

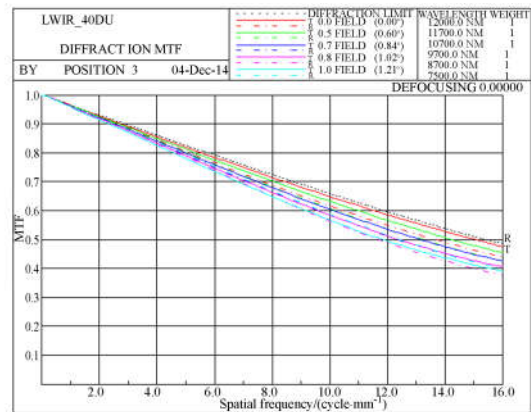
3.2 像质评价

3.2.1 调制传递函数

调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 是红外成像系统像质评价最常用的评价指标。图 3(a)、3(b)、3(c) 分别为长波红外探测成像系统在 20, 10, 40 °C 时各视场的 MTF 曲线。由图可见,长波红外探测成像系统在 20, 10, 40 °C 时的成像性能均接近衍射极限。在 16 lp/mm 空间频率处,全视场内长波红外探测成像系



(b) 10 °C

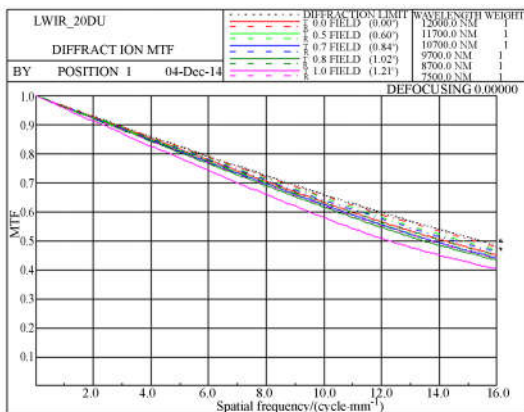


(c) 40 °C

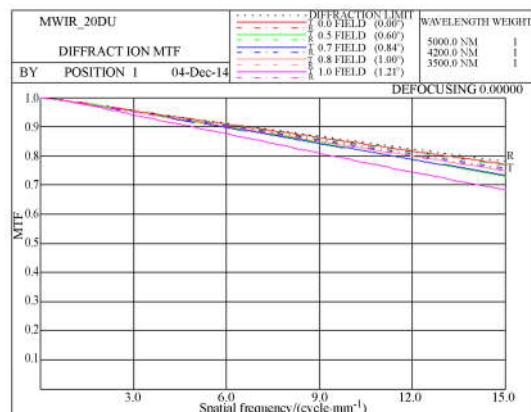
图 3 长波红外探测成像系统的 MTF 曲线
Fig. 3 MTFs of LWIR system

统的 MTF 基本都大于 0.4。

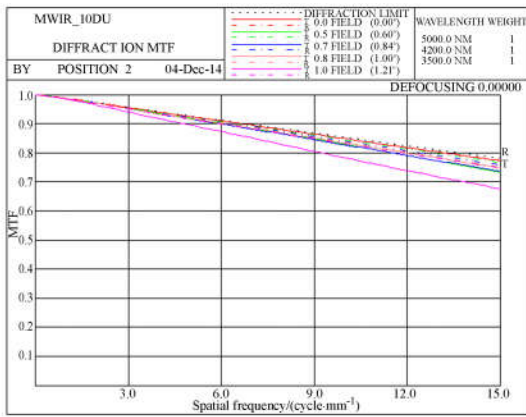
图 4(a)、4(b)、4(c) 分别为中波红外探测成像系统在 20, 10, 40 °C 时各视场的 MTF 曲线。由图可见,中波红外探测成像系统在 20, 10, 40 °C 时的成像性能均接近衍射极限,在 16 lp/mm 空



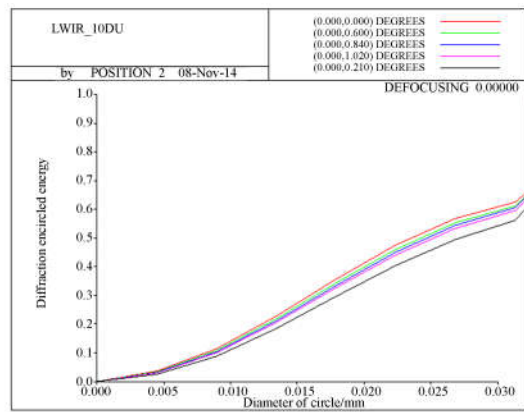
(a) 20 °C



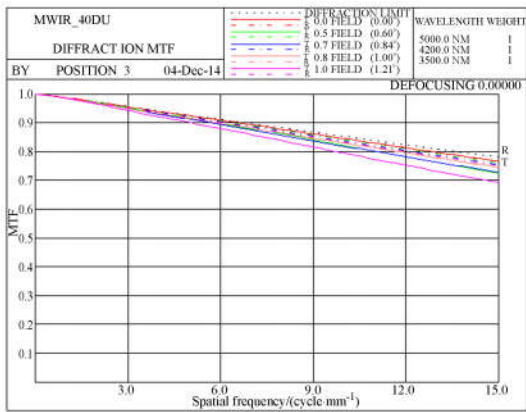
(a) 20 °C



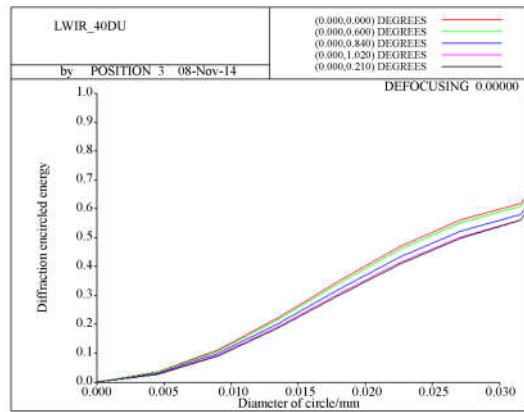
(b)10 °C



(b)10 °C



(c)40 °C



(c)40 °C

图 4 中波红外探测成像系统的 MTF 曲线
Fig. 4 MTFs of MWIR system

图 5 长波红外探测成像系统的能量集中度曲线
Fig. 5 Encircled energies of LWIR system

间频率处,20,10,40 °C时全视场中波红外探测成像系统的 MTF 均优于 0.65。

3.2.2 能量集中度

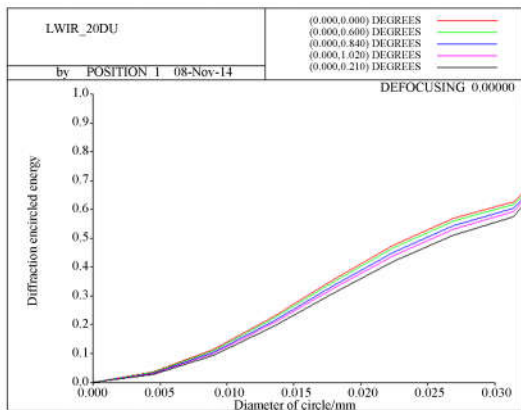
能量集中度反映了红外成像系统各个视场在探测器靶面上的能量分布情况。它同时考虑了衍

射和几何像差的影响因素,是红外成像系统重要的性能评价指标。

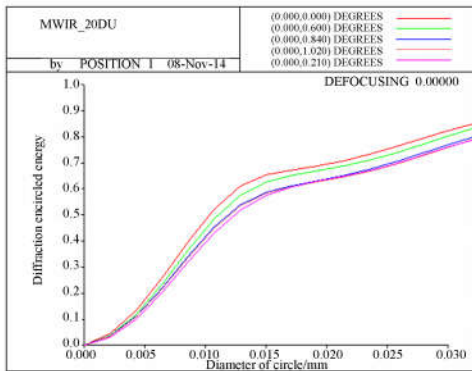
图 5(a)、5(b)、5(c)分别为长波红外探测成像系统在 20,10,40 °C时不同视场的像点径向能量集中度分布曲线。表 2 为长波红外探测成像系统在 20,10,40 °C时单个像元内的能量集中度数据。由图 5 和表 2 可知,长波红外探测成像系统在 10~40 °C时,单个像元内的能量集中度最低为 52.69%,满足指标要求。

表 2 长波红外探测成像系统单个像元内的能量集中度
Tab.2 Encircled energies of a pitch in LWIR system

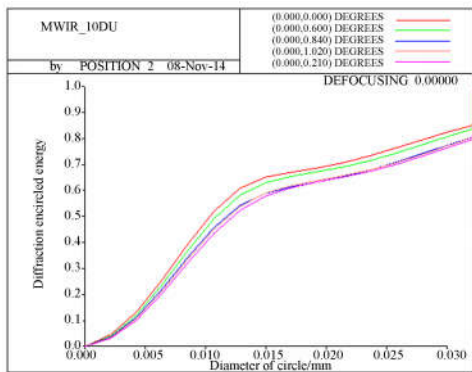
归一化视场	温 度		
	20 °C	10 °C	40 °C
0	59.94	57.63	59.26
0.5	58.82	56.74	57.47
0.7	58.59	57.66	55.27
0.85	56.99	56.93	52.69
1	55.23	54.03	53.10



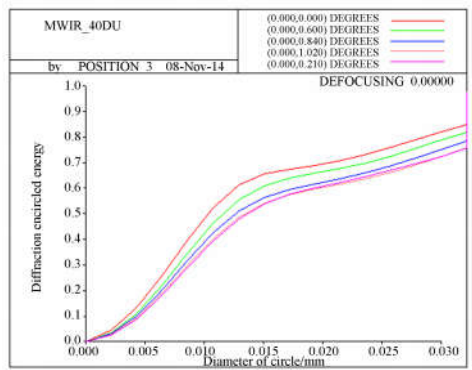
(a)20 °C



(a) 20 °C



(b) 10 °C



(c) 40 °C

图 6 中波红外探测成像系统的能量集中度曲线

Fig. 6 Encircled energies of MWIR system

图 6(a)、6(b)、6(c)分别为中波红外探测成像系统在 20,10,40 °C 时不同视场的像点径向能量集中度分布曲线。表 3 为中波红外探测成像系统在 20,10,40 °C 时单个像元内的能量集中度数据。由图 6 和表 3 可知,中波红外探测成像系统在 10~40 °C 时,单个像元内的能量集中度最低为 74.92%,满足指标要求。

表 3 中波红外探测成像系统单个像元内的能量集中度
Tab. 3 Encircled energies of a pitch in MWIR system

归一化视场	温 度		
	20 °C	10 °C	40 °C
0	81.58	81.63	81.36
0.5	78.55	78.80	77.64
0.7	77.78	77.90	77.44
0.85	77.35	76.76	77.69
1	75.84	74.92	76.07

3.2.3 畸变曲线

畸变是一种轴外像差,是指轴外点主光线在像面上交点的高度和理想像高的差值。畸变不会影响图像的清晰度,也不会降低系统的分辨率,只是使图像的形状发生变化。

图 7(a)、7(b)、7(c)分别为长波红外探测成像系统在 20,10,40 °C 时各视场的畸变曲线。由图可见,长波红外探测成像系统在 20,10,40 °C 时的最大畸变分别为 0.73%、0.75%、0.69%,满足指标要求。

图 8(a)、8(b)、8(c)分别为中波红外探测成像系统在 20,10,40 °C 时各视场的畸变曲线。由图可见,系统在 20,10,40 °C 时的最大畸变分别为 -1.75%、-1.78%、-1.74%,满足指标要求。

红外光学系统在实际生产加工和装配过程中会存在各种误差,如果这些误差太大,势必会影响设备的性能,本文对该共孔径红外双波段光学系统进行了公差分析。按照技术指标中的像质要求,即中波系统 1 个像元的能量集中度大于 60%,长波系统 1 个像元的能量集中度大于 45% 的要求,利用自定义编写的公差分析程序得到:共孔径红外双波段光学系统中的元件间距公差为 0.01 mm,透镜厚度公差为 0.015 mm,透镜表面偏心公差为 0.005 mm,透镜表面倾斜公差为 0.4',透镜表面光圈公差为 3,透镜表面局部光圈公差为 0.5,透镜元件偏心公差为 0.01 mm,透镜元件倾斜公差为 0.4'。以上公差在目前的加工、装配工艺中都可以实现。

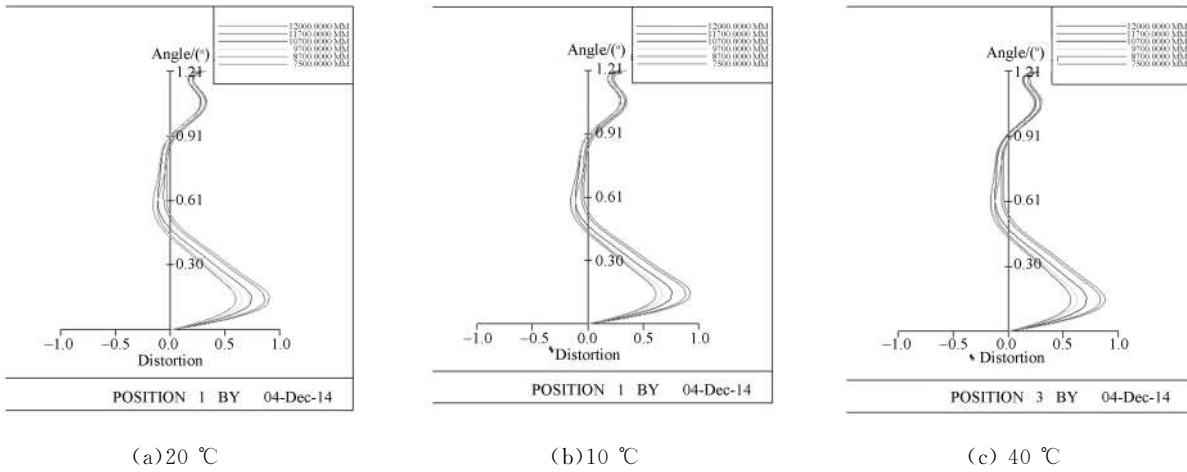


图 7 长波红外探测成像系统的畸变曲线
 Fig. 7 Distortions of LWIR system

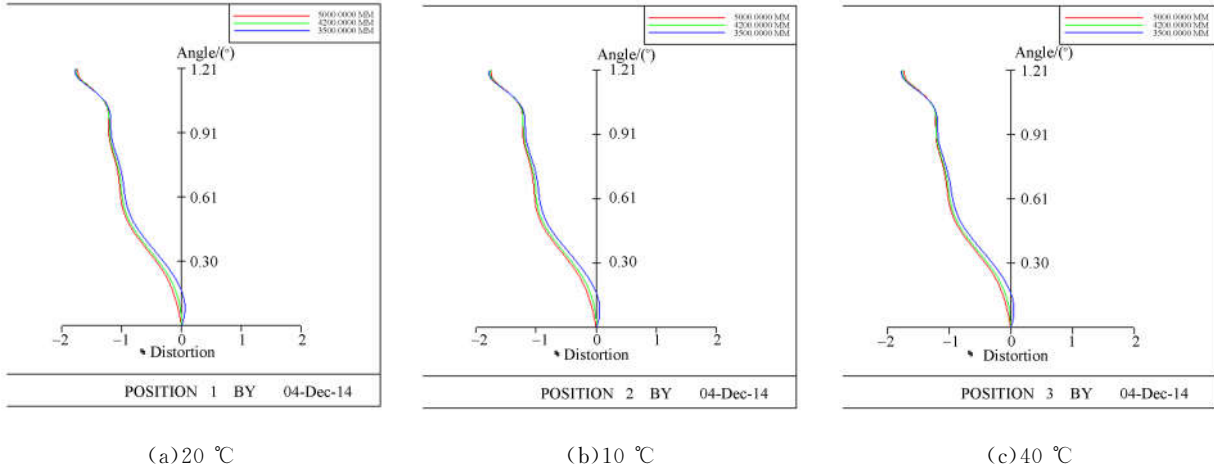


图 8 中波红外探测成像系统的畸变曲线
 Fig. 8 Distortions of MWIR system

4 结 论

本文设计了一套适用于制冷型 320 pixel × 256 pixel 中波红外凝视焦平面阵列探测器和 320 pixel × 256 pixel 长波红外凝视焦平面阵列探测器的共孔径消热差折反射式红外双波段光学系统。该系统共用主镜、次镜和准直镜组,利用分光镜实现中波红外、长波光外的光谱分光,分光镜后接各自的校正镜组校正剩余像差。首先分析了该系统的设计原理、设计过程以及工程设计时需考虑的因素,最终在 10~40 °C 的环境下,该光学系统的长波和中波两路系统均取得了良好的成像性

能,满足设计要求。该方案不仅适用于制冷型的共孔径消热差折反射式长波红外/中波红外双波段光学系统,还适用于匹配非制冷红外探测器的共孔径消热差折反射式长波红外/中波红外双波段光学系统和共孔径消热差折反射式可见光/红外双波段光学系统,对于消热差双波段光学系统的实现具有指导意义。

5 致 谢

感谢中国科学院青年创新促进会提供的学术交流平台!

参考文献:

- [1] 骆守俊,夏寅辉,杨宁宁,等.扫描型长波红外连续变焦光学系统[J].中国光学,2015,8(1):107-113.
LUO SH J, XIA Y H, YANG N N, *et al.*. Long-wavelength infrared continuous zoom scanning optical system[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(1): 107-113. (in Chinese)
- [2] 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):395-402.
ZHANG B, CUI E K, HONG Y F. Infrared MWIR/LWIR dual-fov common-path optical system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(2): 395-402. (in Chinese)
- [3] 付强,张新.中波/长波双色红外光学系统材料选择[J].光学学报,2015,35(2):0208003.
FU Q, ZHANG X. Materials choose for mid-wave/long-wave dual-waveband infrared optics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(2):0208003. (in Chinese)
- [4] 张欣婷,安志勇.双层谐衍射双波段红外消热差光学系统设计[J].光学学报,2013,33(6):0622004.
ZHANG X T, AN ZH Y. Design of infrared athermal optical system for dual-band with double-layer harmonic diffraction element[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(6):0622004. (in Chinese)
- [5] NEVO Y. Dual-band optics[J]. *Optical Engineering*, 2013, 52(5): 053002.
- [6] VIZGAITIS J. Third generation infrared optics[J]. *SPIE*, 2008, 6940: 69400S.
- [7] SCHREER O. Dual-band camera system with a dvanced image processing capability[J]. *SPIE*, 2007, 6542: 65421C.
- [8] VIZGAITIS J. Dual f-number optics for third generation FLIR systems[J]. *SPIE*, 2005, 5783: 875-885.
- [9] JIANG H, QIAN Y. High speed dual spectral infrared imaing[J]. *Optical Engineering*, 1993, 32(6): 1281-1283.
- [10] 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):489-493.
WANG H T, GENG A B. Unified infrared imaing optical system of dual spectral[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2008, 37(3): 489-493. (in Chinese)
- [11] 刘英,孙强,卢振武,等.折射_谐衍射红外双波段成像光谱仪系统研究[J].物理学报,2008,37(3):489-493.
LIU Y, SUN Q, LU ZH W, *et al.*. Hyper-spectral imaging system with harmonic diffraction element in medium and far infrared[J]. *Acta Physica Sinica*, 2008, 37(3): 489-493. (in Chinese)
- [12] 董科研,潘玉龙,王学进,等.谐衍射红外双波段双焦光学系统设计[J].光学精密工程,2008,16(5):764-770.
DONG K Y, PAN Y L, WANG X J, *et al.*. Optical design of a HDE infrared dual-band step-zoom system[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(5): 764-770. (in Chinese)
- [13] 刘英,王学进,潘玉龙,等.谐衍射中、长波红外超光谱成像系统设计[J].光学精密工程,2010,18(3):579-585.
LIU Y, WANG X J, PAN Y L, *et al.*. Design of hyper-spectral imaging with harmonic diffractive element in medium and long infrared[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(3): 579-585. (in Chinese)
- [14] 王孟军,赵翠玲,韩邦杰,等.基于谐衍射的共轴双波段红外光学系统设计[J].红外与激光工程,2013,42(10):2732-2737.
WANG M J, ZHAO C L, HAN B J, *et al.*. Design of coaxial dual-band IR optical system based on harmonic diffraction[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(10):2732-2737. (in Chinese)
- [15] 刘琳,贺谊亮,张兴德,等.基于谐衍射特性的红外双波段光学系统设计[J].激光与红外,2012,42(1):85-89.
LIU L, HE Y L, ZHANG X D, *et al.*. Design of a

- dual-band IR optic system based on harmonic diffraction[J]. *Laser and Infrared*, 2012, 42(1): 85-89. (in Chinese)
- [16] 虞林瑶,魏群,张天翼,等. 中波红外长焦距折反光学系统设计 [J]. *中国光学*, 2015, 8(2): 234-240. YU L Y, WEI Q, ZHANG T Y, *et al.*. Design of long focal infrared catadioptric optical system for mul-guided system[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(2):234-240. (in Chinese)
- [17] 白瑜,廖志远,李华,等. 硫系玻璃及其在现代红外热成像系统中的应用[J]. *中国光学*, 2014, 7(3): 449-456. BAI Y, LIAO ZH Y, LI H, *et al.*. Application of the chalcogenide glass in modern infrared thermal imaging systems[J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(3): 449-456. (in Chinese)

作者简介:



白 瑜(1982—),男,山西原平人,博士研究生,助理研究员,2009年于中国科学院西安光学精密机械研究所获得硕士学位,主要从事光机系统设计、红外探测技术、空间探测技术、光电信息处理技术等方面的研究。E-mail: baiyu91258@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)