

文章编号: 1672-8785(2022)10-0001-09

高分辨率、大面阵红外无热化 光学系统设计

吴海清

(1. 凯迈(洛阳)测控有限公司, 河南 洛阳 471009;

2. 中国空空导弹研究院, 河南 洛阳 471009)

摘 要: 利用普通红外光学材料实现的大视场光学被动无热化系统应用于当前新型高分辨率、大面阵红外探测器时存在透镜数量多, 不易实现轻量化、小型化的技术问题。为此, 引入了低折射率温度系数的硫系玻璃, 并设计了一种工作波段为 $8\sim 12\ \mu\text{m}$ 、视场为 $40^\circ\times 32.5^\circ$ 、 F 数为 1.0 且适配 1280×1024 探测器的光学被动无热化成像光学系统。设计结果表明, 在 $-55^\circ\text{C}\sim 70^\circ\text{C}$ 的工作温度范围内, 探测器特征频率 42 lp/mm 处的光学传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 值均大于 0.35, 系统成像性能良好, 能够满足实际工程应用需求。

关键词: 硫系玻璃; 红外光学系统; 无热化; 大视场

中图分类号: O439; TH74 **文献标志码:** A

DOI: 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.10.001

Design of High-Resolution and Large-Area-Array Athermalized Infrared Optical System

WU Hai-qing

(1. CAMA (Luoyang) Measurement and Control Co., Ltd., Luoyang 471009, China;

2. China Airborne Missile Academy, Luoyang 471009, China)

Abstract: The large field-of-view optical passive athermalization system realized by using ordinary infrared optical materials has a technical problem that the number of lenses is large, and it is difficult to realize the light-weight and miniaturization when this system is applied to the current new high-resolution, large-area-array infrared detectors. To this end, a chalcogenide glass with a low temperature coefficient of refractive index is introduced, and an optical passive athermalization imaging optical system with a working band of $8\sim 12\ \mu\text{m}$, a field-of-view of $40^\circ\times 32.5^\circ$, an F -number of 1.0, and a 1280×1024 detector are designed. The design results show that in the operating temperature range of $-55\sim 70^\circ\text{C}$, the modulation transfer function (MTF) values at the detector characteristic frequency of 42 lp/mm are all greater than 0.35. The imaging performance of the

收稿日期: 2022-07-23

作者简介: 吴海清(1982-), 男, 陕西榆林人, 高级工程师, 主要从事成像光学系统设计与应用研究。

E-mail: whqcust@163.com

system is good, which can meet the requirements of practical engineering applications.

Key words: chalcogenide glass; infrared optical system; athermalized design; large field-of-view

0 引言

近年来,随着红外探测器制造工艺技术的进步,非制冷红外探测器在提高灵敏度及帧频的同时扩大了阵列规模、减小了像元间距,从而实现了高分辨率。这就提升了非制冷红外系统的目标探测与识别能力,使得该系统在军民领域的广泛应用成为可能。

在国外,美国 Raytheon 公司开发了阵列规模为 2048×1536 、像元间距为 $17\ \mu\text{m}$ 的大面阵非制冷红外探测器;英国 BAE 公司开发了阵列规模为 1920×1200 、像元间距为 $12\ \mu\text{m}$ 的大面阵非制冷红外探测器。在国内,武汉高德红外股份有限公司实现了阵列规模为 1280×1024 、像元间距为 $12\ \mu\text{m}$ 的非制冷长波红外探测器的量产;烟台艾睿光电科技有限公司也开发了阵列规模为 1280×1024 、像元间距为 $12\ \mu\text{m}$ 的氧化钒非制冷红外焦平面探测器;北方广微科技有限公司研制的像元间距为 $17\ \mu\text{m}$ 的 2048×1536 全画幅非制冷红外探测器可适用于各个军民高端应用领域^[1-2]。

在工程应用中,光学镜头的靶面应大于探测器的靶面,否则可见光系统和红外系统就会分别出现图像四角发暗和图像四角发白的现象。当前新型 1280×1024 红外探测器的靶面大,导致光学系统设计难度大。因此,研究能够适配这种高分辨率、大面阵红外探测器的无热化红外光学系统具有重要意义。

由于温度变化会造成红外光学材料的折射率发生明显改变,当红外光学系统的工作环境温度发生变化时,成像光学系统的像面会产生移动,从而造成系统成像性能下降。因此,对于工作环境温度变化较大的红外光学系统来

说,需要进行无热化设计,以消除或减小温度效应对成像质量的影响,使得光学系统在一个较大的温度范围内保持良好的成像性能^[3]。

本文针对像元间距为 $12\ \mu\text{m}$ 的 1280×1024 非制冷红外探测器,设计了一种工作波段为 $8 \sim 12\ \mu\text{m}$ 、视场为 $40^\circ \times 32.5^\circ$ 、 F 数为 1.0 的大视场红外光学系统。在设计中引入了折射率温度系数较小的硫系玻璃。结果表明,在进行大视场、大面阵无热化红外光学系统设计时,硫系玻璃可以在减少透镜数量的同时减少透镜表面非球面的应用数量,从而实现小型化、轻量化设计。该系统在不同温度条件下探测器所对应的特征频率 $42\ \text{lp/mm}$ 处的 MTF 值均大于 0.35,成像性能良好,结构简单,装调效率高,可广泛应用于工作温度范围变化较大的安防监控、夜视导航、小型机载光电系统等军民领域。

1 设计思路

不同红外光学材料具有不同的热特性。光学被动无热化是通过光学系统中不同热特性材料之间的组合来消除温度对光学系统成像的影响,从而实现无热化设计。此类结构具有结构简单、可靠性强、装配效率高的特点,适用于批量化生产。

硫系玻璃是含有硫系元素 S、Se、Te 中的一种或几种,同时还含有 Ge、Si、As、Sb 等元素中的一种或几种的非晶态材料,其红外透过范围为 $1 \sim 14\ \mu\text{m}$,在近红外至远红外波长区域内均具有良好的光学透过性能。其次,硫系玻璃的转变温度较低、化学稳定性良好,可以进行精密模压加工。此外,由于折射率温度系数低、色散系数小,硫系玻璃可作为消色差及消热差无热化设计中的红外材料使用。

表 1 硫系玻璃及其特性参数

厂家及玻璃参数	玻璃牌号								
湖北新华光	IRG201	IRG202	IRG203	IRG204	IRG205	IRG206	IRG207	—	—
宁波大学	NUB-IR6	NUB-IR8	NUB-IR1	—	NUB-IR2	NUB-IR5	NUB-IR7	NUB-IR3	NUB-IR4
成都光明	HWS3	HWS4	HWS2	—	HWS1	HWS6	HWS5	—	—
德国 Vitron	IG2	—	—	—	IG5	IG6	IG4	—	—
密度(g/cm^3)	4.41	4.4	4.72	4.72	4.67	4.63	4.47	4.72	4.7
膨胀系数($10^{-6}/^\circ\text{C}$)	12.1	17	15.5	20.9	15	20.6	20.4	18.1	11
努氏硬度(kg/mm^2)	150	152	137	115	132	118	126	—	—
杨氏模量(Gpa)	21.5	17.89	19.11	19.8	29.6	18.5	20.5	21.75	35.4
扭转模量(Mpa)	19	6.98	7.52	—	18	17	18	8.4	13.8
泊松比	—	0.28	0.27	0.37	0.26	0.33	—	0.29	0.28
热导率(W/mK)	0.24	0.28	0.23	—	0.26	0.24	0.18	0.232	0.324
折射率温度系数($10^{-6}/\text{K}$)	67.2	55	58	18	87	32	19.9	—	—
折 射 率	8 μm	2.5026	2.4999	2.5929	2.7730	2.6099	2.7850	2.6131	2.4092
	9 μm	2.4999	2.4973	2.5895	2.7704	2.6064	2.7823	2.6112	2.4069
	10 μm	2.4968	2.4944	2.5858	2.7677	2.6026	2.7795	2.6091	2.4046
	11 μm	2.4931	2.4911	2.5816	2.7647	2.5985	2.7766	2.6066	2.4017
	12 μm	2.4891	2.4874	2.5769	2.7614	2.5948	2.7737	2.6041	2.3979
色散	10 μm	111	119.5	99.1	132.77	102.2	157.5	179	124.3
								124.3	125.4

目前应用较多的硫系玻璃主要有美国 A-morphous 公司生产的 AMTIR-1/2/3/4/5/6 硫系玻璃和德国 VITRON 公司生产的 IG2/3/4/5/6 硫系玻璃。国内则有湖北新华光信息材料有限公司生产的 IRG201/202/203/204/205/206 硫系玻璃、宁波大学研发的 NBU-IR1/2/3/4/5/6/7/8 硫系玻璃、成都光明光电股份有限公司生产的 HWS1/2/3/4/5/6 硫系玻璃。其中,根据透镜加工厂家反馈,IRG206 硫系玻璃的镀膜牢固度及可加工性较好,目前在长波红外波段应用较多。表 1 列出了不同厂家所生产的不同牌号硫系玻璃的对应关系及其性能参数^[4-7]。

传统长波红外光学系统所采用的透镜材料有 Ge、ZnSe 等,其折射率温度系数分别为 $400 \times 10^{-6}/\text{K}$ 、 $61 \times 10^{-6}/\text{K}$ 。IRG206 硫系玻璃的折射率温度系数为 $32 \times 10^{-6}/\text{K}$ 。可见硫系玻璃的折射率温度系数低,因此在进行高分辨率、大面阵无热化红外光学系统设计时,通过引入硫系玻璃使得系统由于工作温度变化所造成的像面移动量较小,以减少被动无热化系

统的透镜材料种类及数量,进而为实现系统的小型化和轻量化设计提供可能。

2 设计实例

2.1 设计指标

本文针对目前阵列规模为 1280×1024 、像元间距为 $12 \mu\text{m}$ 的新型高分辨率非制冷红外探测器进行相关光学系统设计(参数见表 2)。

表 2 光学系统技术指标

参数	技术指标
探测器像元数	1280×1024
像元尺寸	$12 \mu\text{m}$
响应波段	$8 \sim 12 \mu\text{m}$
F 数	1.0
像面直径	19.7 mm
视场	$40^\circ \times 32.5^\circ$
工作温度	$-55^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$

2.2 无热化光学系统设计

该系统的工作温度范围为 $-55^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$,视场要求为 $40^\circ \times 32.5^\circ$,属于宽温大视场红外光学系统。在光学设计中采用反远距结构,即反远距物镜由一个负光焦度前组和一个正光焦

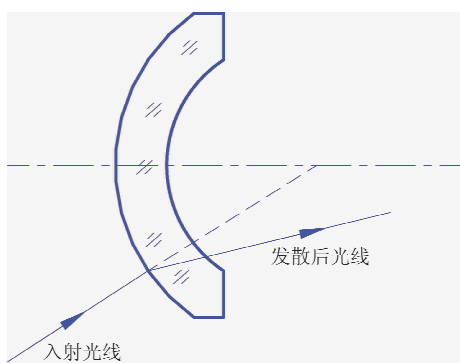


图 1 弯月形负透镜前组光线发散示意图

度后组构成,前组与后组采取分离的形式。如图 1 所示,前组负透镜对轴外光线进行发散,使得发散后的光线与光轴的夹角明显减小,从而有利于后组元件进行像差校正。为了使负光焦度前组透镜的表面不至于极度弯曲,第一片透镜材料选用折射率较高的单晶锗材料。

由于在设计时要对大视场系统的轴外像差进行校正,同时需要消除光学系统在不同工作温度条件下的热差,因此引入折射率温度系数较小的 IRG206 硫系玻璃与其它红外材料搭配实现光学被动无热化。同时引入非球面及衍射面,这样就增加了一个面型的自由度。与球面透镜不同,非球面透镜的表面曲率从中心至边缘不是固定的,而是连续变化的,所以认为非球面的设计自由度可达到无限个。因此,与球面透镜相比,非球面透镜在进行光学系统的像差校正方面具有很大优势。此外,由于衍射元件的色散系数为负值,与折射元件的色散系数相反,因此与折射系统混合能够消除系统色差。在改善系统像质的同时减少系统镜片数量,以减小体积、减轻重量,从而实现小型化设计。

最终设计的高分辨率、大面阵无热化红外光学系统由五片透镜组成,如图 2 所示。系统中各透镜所使用的材料依次为 Ge、IRG206、ZnSe、IRG206、IRG206。

图 3、图 4、图 5 分别为这种高分辨率、大面阵无热化红外光学系统在常温 20℃ 以及极限温度 -55℃、70℃ 条件下的 MTF 图。可以看出,该系统在不同温度条件下探测器所对应的特征频率 42 lp/mm 处的 MTF 值均大于

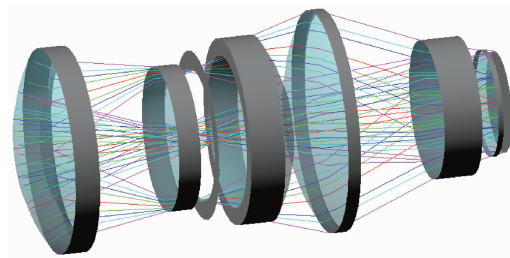


图 2 光学系统的三维光路图

0.35。因此,这种光学系统在整个温度范围内具有优良性能,达到无热化设计的要求,能够满足实际工程应用需求。

光学系统的衍射艾里斑直径为 $2.44\lambda F^\#$, 因此该系统的艾里斑直径为 $2.44 \times 10 \times 1 = 24.4 \mu\text{m}$ 。图 6、图 7、图 8 分别为这种高分辨率、大面阵无热化红外光学系统在常温 20℃ 以及极限温度 -55℃、70℃ 条件下的点列图。可以看出,该系统在 70℃ 时边缘视场的均方根(Root Mean Square, RMS)弥散斑直径最大 ($17.2 \mu\text{m}$), 小于艾里斑直径;其余温度条件及不同视场下的弥散斑直径更小。因此,这种光学系统能够满足清晰成像的要求。

图 9 为本文系统的场曲及畸变图。可以看出,该系统边缘视场的畸变不大于 4.2%, 0.7 视场的畸变不大于 2.5%, 满足系统使用要求。

由于 1280×1024 红外探测器的靶面尺寸较大,若光学系统的轴外照度较低,则成像图像会存在四角发暗的问题。图 10 为本文系统的相对照度曲线图。可以看出,该系统边缘视场的相对照度大于 80%, 满足应用要求。

对该光学系统的各个透镜进行公差分配,将系统的各项公差灵敏度均降到较低值,从而降低光学系统的装配精度要求,提高系统的装配效率。

主要公差设定值如下:(1)光圈:3。(2)局部光圈:0.5。(3)透镜厚度误差: $\pm 0.02 \text{ mm}$ 。(4)透镜间隔误差: $\pm 0.02 \text{ mm}$ 。(5)表面偏心: $\pm 0.02 \text{ mm}$ 。(6)表面倾斜: $\pm 0.02 \text{ mm}$ 。(7)透镜偏心: $\pm 0.02 \text{ mm}$ 。(8)透镜倾斜: $1'$ 。(9)非球面面形误差: $0.05 \mu\text{m}$ (RMS 值)。

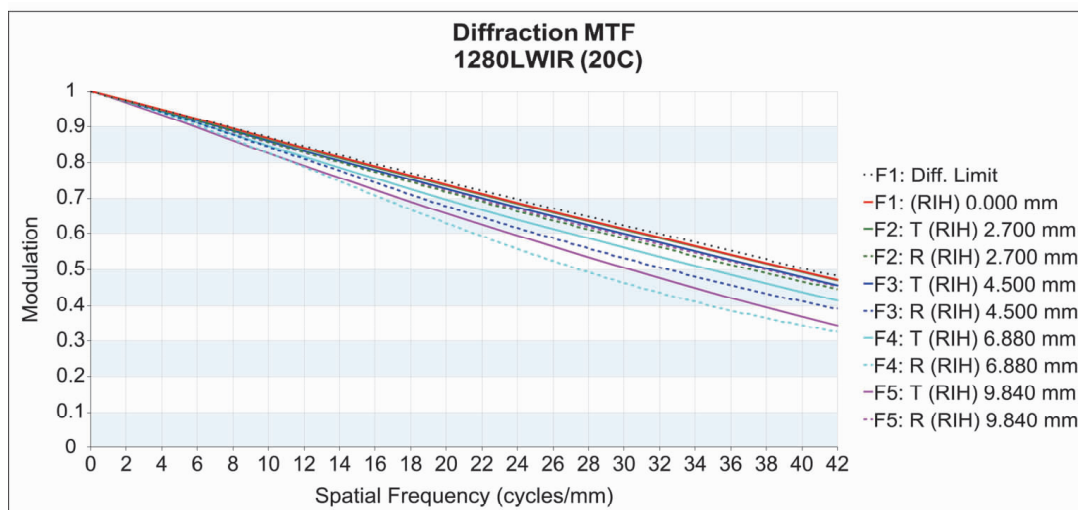


图 3 20℃时光学系统的 MTF 图

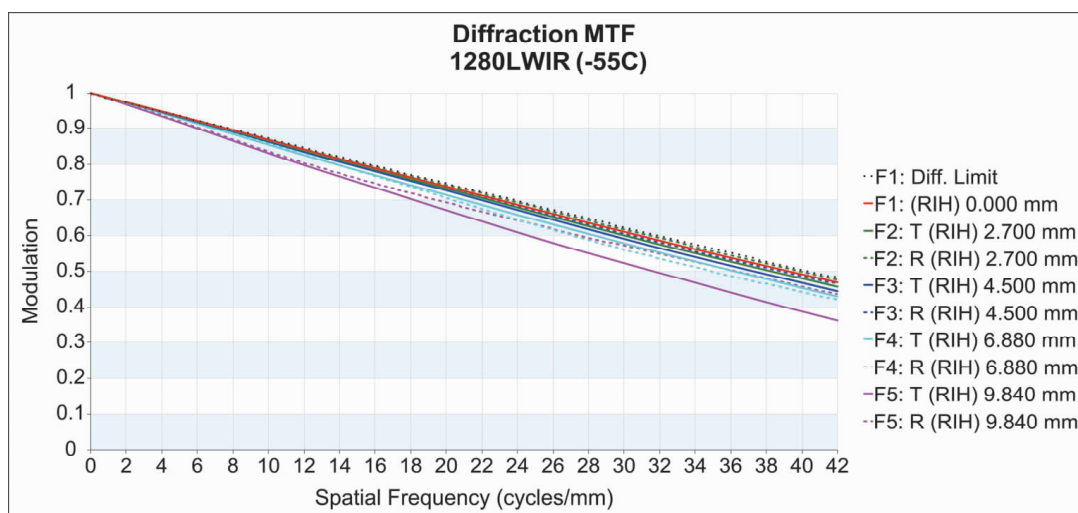


图 4 -55℃时光学系统的 MTF 图

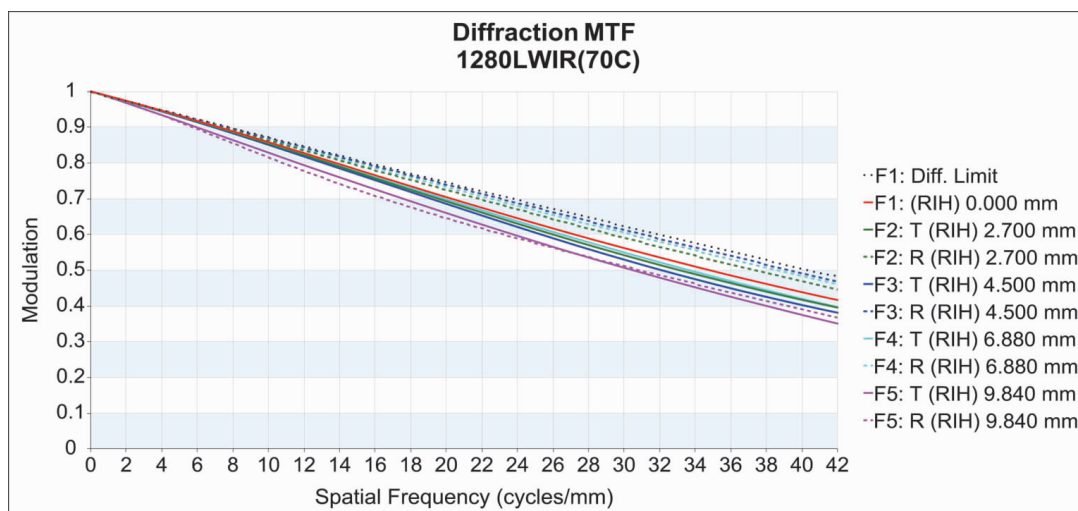


图 5 70℃时光学系统的 MTF 图

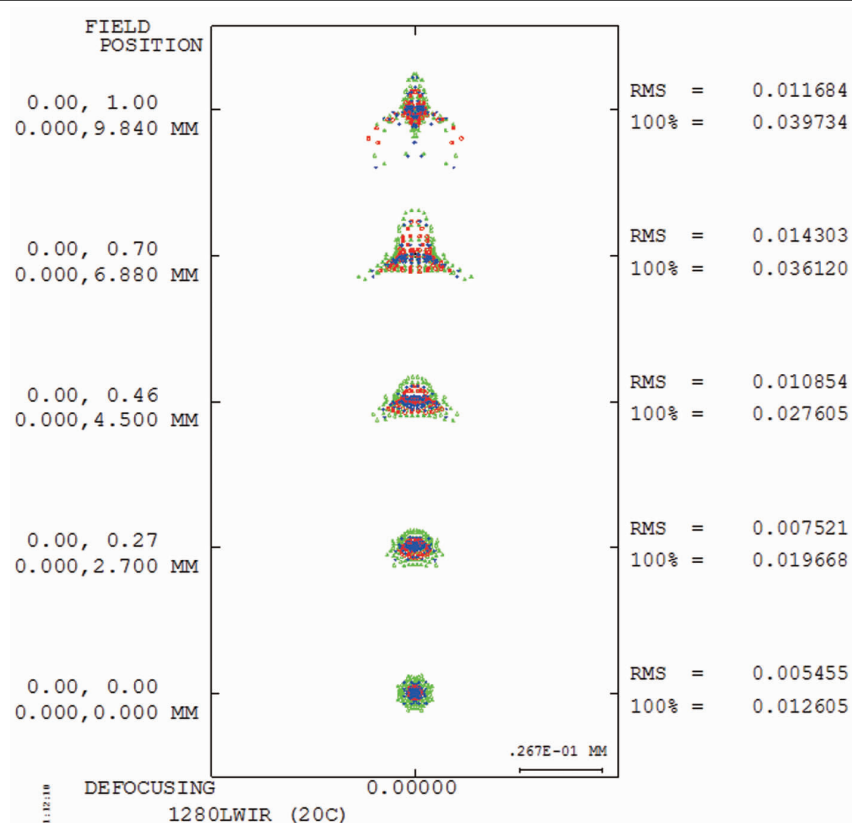


图 6 20℃时光学系统的点列图

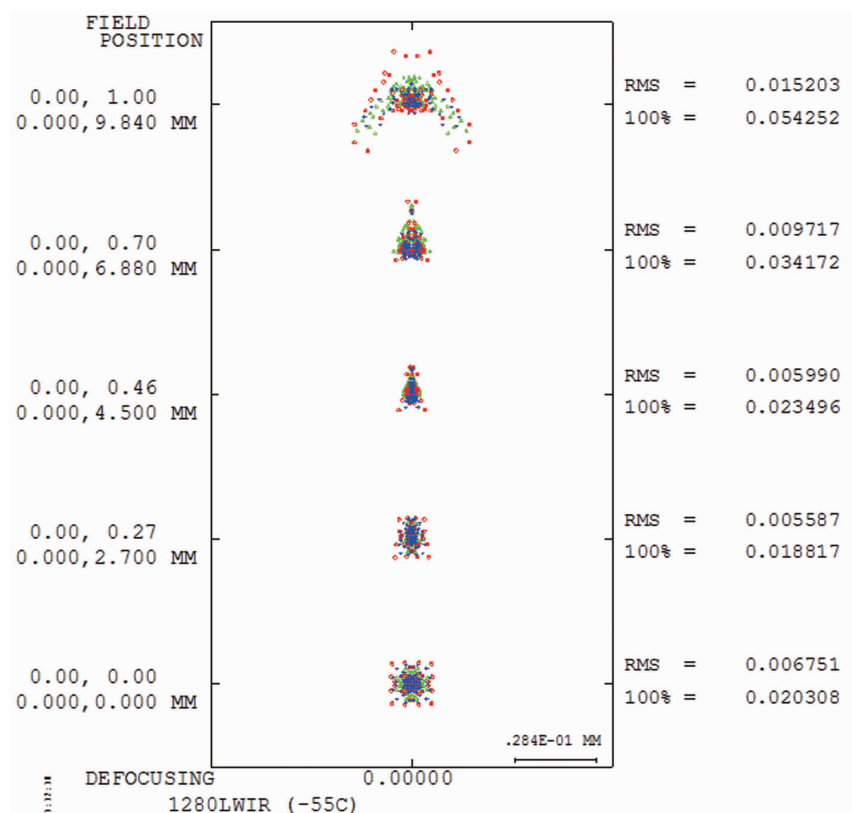


图 7 -55℃时光学系统的点列图

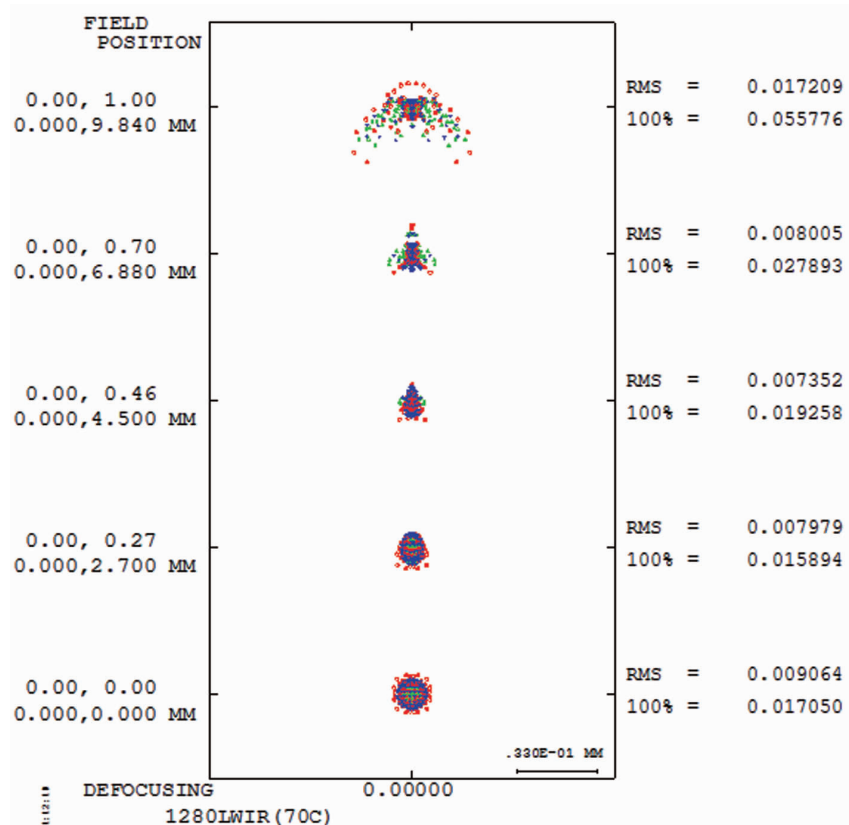


图 8 70℃时光学系统的点列图

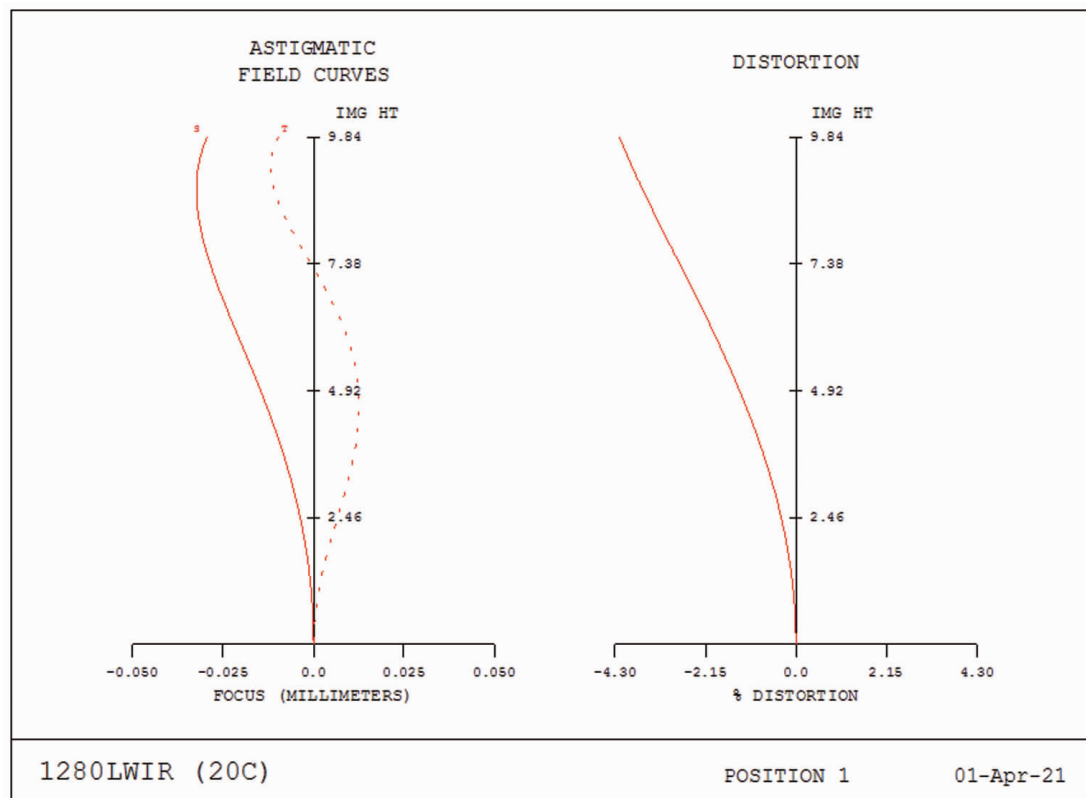


图 9 光学系统的场曲及畸变图

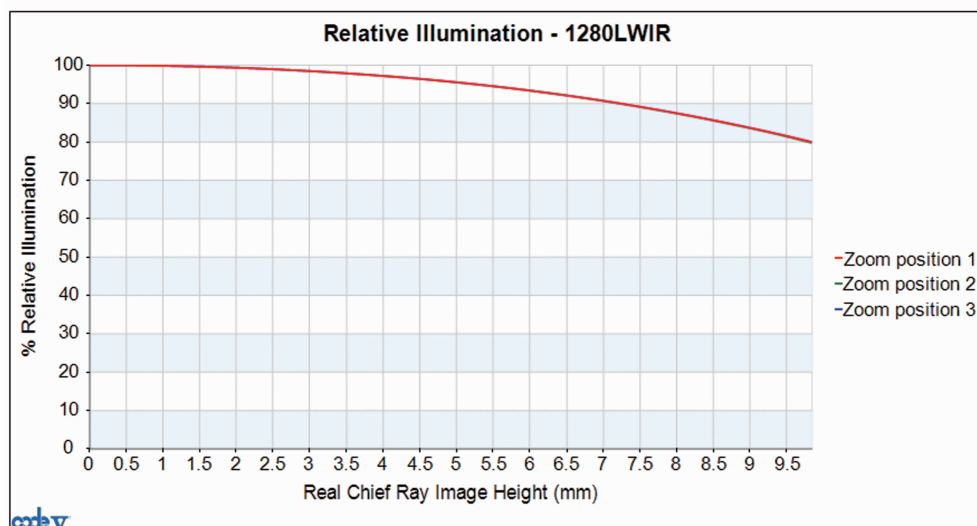


图 10 相对照度图

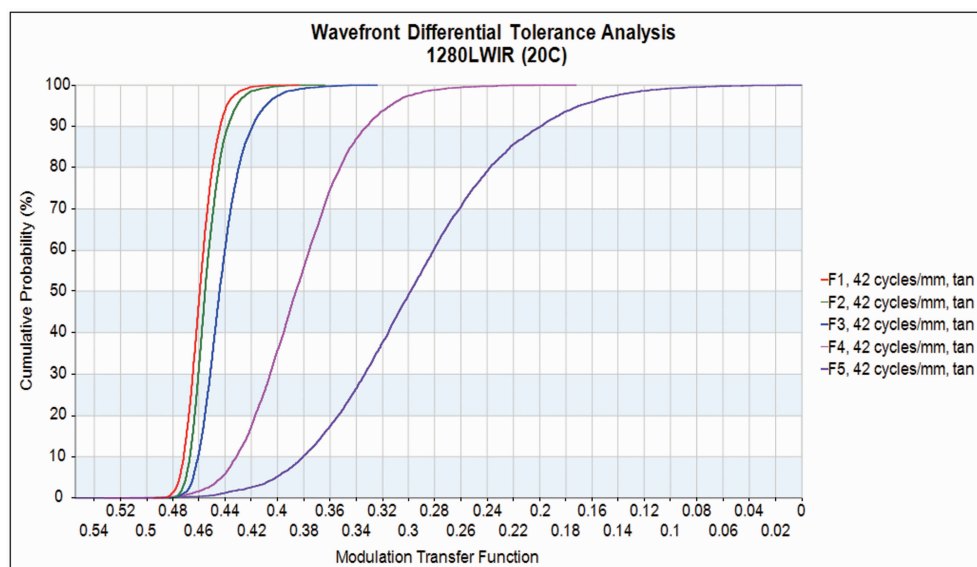


图 11 光学系统的公差曲线

经过公差分析,在上述给定的公差条件下,得到了图 11 所示的公差曲线。本文系统中心视场在 42 lp/mm 处的 MTF 值超过 90% 以上的概率能够达到 0.44; 0.7 视场在 42 lp/mm 处的 MTF 值超过 90% 以上的概率能够达到 0.32; 边缘视场在 42 lp/mm 处的 MTF 值超过 90% 以上的概率能够达到 0.20。由此可见,该光学系统的公差灵敏度较低,加工装调后可很好地保障产品的性能,从而实现良好成像,满足使用要求。

3 成像效果试验

图 12 为光学镜片加工后的实物图。图 13

为装调后的镜头成像图。可以看到,画面细腻,边缘锐利,整体成像效果很好。



图 12 镜片实物图



图 13 外景成像效果图

4 结束语

本文开展了硫系玻璃在宽温红外光学系统无热化设计中的应用研究。针对目前阵列规模为 1280×1024 、像元间距为 $12 \mu\text{m}$ 的新型高分辨率非制冷长波红外探测器, 设计了一种温度范围为 $-55^\circ\text{C} \sim 70^\circ\text{C}$ 、视场为 $40^\circ \times 32.5^\circ$ 的非制冷长波红外成像光学系统。该系统结构简单, 在不同温度条件下成像性能良好, 将在工作温度范围变化较大的安防监控、夜视导航、小型机载光电系统等军民领域具有广泛的应用前景。下一步的研究重点是利用硫系玻璃实现连续变焦光学系统的小型化、轻量化设计。

参考文献

- [1] 吴海清, 王朋. 小型化大面阵非制冷红外连续变焦光学系统设计 [J]. 红外, 2020, 41(2): 1-6.
- [2] 李煜, 谭果, 史晔, 等. 一种 300 万像素全画幅非制冷红外探测器 [J]. 红外技术, 2019, 41(11): 991-997.
- [3] 吴海清, 田海霞, 崔莉. 大视场大相对孔径长波红外机械无热化光学系统设计 [J]. 红外, 2015, 36(8): 1-4.
- [4] 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.
- [5] 付强, 张新. 基于硫系玻璃的中波红外光学系统无热化设计 [J]. 红外与激光工程, 2015, 44(5): 1467-1471.
- [6] 王静, 吴越豪, 戴世勋, 等. 硫系玻璃在长波红外无热化连续变焦广角镜头设计中的应用 [J]. 红外与激光工程, 2018, 47(3): 0321001.
- [7] 吴海清. 基于硫系玻璃的大视场红外无热化光学系统设计 [J]. 红外, 2021, 42(7): 1-8.