

文章编号: 1672-8785(2021)07-0001-08

## 基于硫系玻璃的大视场红外 光学系统无热化设计

吴海清<sup>1,2</sup>

(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:** 在大视场红外光学系统中, 基于普通红外光学材料实现的光学被动无热化系统存在透镜数量多且不易实现轻量化、小型化的技术问题。为解决这个问题, 采用硫系玻璃与常用红外材料组合来实现光学被动无热化, 并设计了一种视场为  $40^\circ \times 32.5^\circ$ 、工作波段为  $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 、 $F$  数为 1.0、工作温度范围为  $-55^\circ\text{C} \sim +70^\circ\text{C}$  的小型化非制冷红外成像光学系统。设计结果表明, 该系统结构简单紧凑、成像性能良好, 在空间频率 42 lp/mm 处的调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 值大于 0.3, 能够满足实际工程应用的需求。

**关键词:** 硫系玻璃; 红外光学系统; 无热化设计; 大视场

**中图分类号:** O439; TH74 **文献标志码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2021.07.001

## Athermalized Design of Infrared Optical System with Large Field-of-View Based on Chalcogenide Glass

WU Hai-qing<sup>1,2</sup>

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

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

**Abstract:** In the infrared optical system with a large field-of-view, the optical passive athermalization system based on ordinary infrared optical materials has the technical problems of a large number of lenses, and it is difficult to achieve lightweight and miniaturization. To solve this problem, a combination of chalcogenide glass and common infrared materials is used to achieve passive optical athermalization, and a miniaturized uncooled infrared imaging optical system with a field-of-view of  $40^\circ \times 32.5^\circ$  is designed. Its operating waveband is  $8 \sim 12 \mu\text{m}$ , the  $F$  number of the optical system is 1.0, and the operating temperature range is  $-55^\circ\text{C} \sim +70^\circ\text{C}$ . The design results show that the system has a simple and compact structure and good imaging performance. The modulation transfer function (MTF) value at the spatial frequency of 42 lp/mm is greater than 0.3, which can meet the application requirements of actual projects.

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

**收稿日期:** 2021-03-05

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

E-mail: whqcust@163.com

## 0 引言

由于具有低成本、低功耗、小型化、长寿命和高可靠性等优点,非制冷红外焦平面热成像技术近年来在夜视导航、安防监控等军事和民用领域均得到了广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。

一般来讲,常用红外光学材料的折射率随温度变化明显。因此,环境温度的升降会导致光学系统的像面发生漂移,使光学系统的成像质量下降,甚至不能正常工作。为了缓减或解决由温度效应带来的成像质量下降问题,通过采用一定的补偿技术使光学系统在一个较宽的温度范围内保持良好的成像质量。这种技术通常被称为无热化技术<sup>[3-5]</sup>。光学被动无热化系统由于具有高可靠性而被广泛应用于各类光学系统。然而,大视场光学系统需要兼顾大视场系统轴外像差校正和无热化两方面因素,因此采用传统透镜材料设计的无热化系统的镜片数量多,不易满足轻量化、小型化需求<sup>[6-7]</sup>。

本文针对 640×512 元非制冷型红外探测器,设计了一种工作波段为 8~12 μm、视场为 40°×32.5°、F 数为 1.0、工作温度范围为 -55℃~+70℃ 的大视场无热化红外光学系统。分别采用常用红外材料以及硫系玻璃与常用材料组合两种方式进行了无热化设计。结果表明,由于具有低折射率温度系数,硫系玻璃应用于大视场红外光学系统无热化设计时可减少系统透镜及非球面的数量。简化结构后的系统在空间频率 42 lp/mm 处的 MTF 值大于 0.3。该系统结构简单、装调容易、分辨率高、像质好,适用于环境温度变化剧烈的夜视导航、小型机载光电系统等领域。

## 1 设计思路

光学被动无热化设计是利用不同红外光学材料具有不同的热特性这一特点,通过在光学系统中对不同热特性材料进行组合来消除环境温度变化对光学系统成像的影响。此类结构具有简单、可靠以及装配效率高等特点,适于大批量生产。

硫系玻璃是指玻璃中含有硫系元素 S、Se 和 Te 中的一个或几个,同时加入 Ge、Si、As、Sb 等元素中的一个或几个后所形成的非晶态光学材料。硫系玻璃的光谱透过范围为 1~14 μm,在近红外、短波红外、中波红外和长波红外波段具有良好的光学透过性能。其次,硫系玻璃的转变温度低、化学稳定性好,可采用精密模压工艺进行光学透镜的加工,适于透镜的大批量生产。此外,硫系玻璃的折射率温度系数和色散系数较低,因此可作为消色差及无热化设计的红外材料。硫系玻璃种类很多。目前,国外硫系玻璃主要为美国 Amorphous 公司生产的 AMTIR-1、2、3、4、5、6 系列,德国 Vitron 公司生产的 IG2、3、4、5、6 系列,法国 Umicore 公司生产的 GASIR1、2、3 系列等。国内硫系玻璃主要为成都光明光电股份有限公司生产的 HWS1、2、3、4、5、6 系列,湖北新华光信息材料有限公司生产的 IRG201、202、203、204、205、206 系列,宁波大学研制的 NBU-IR1、2、3、4、5、6、7、8 系列。其中,目前在长波红外波段应用较多的是 IG6 产品,与其光学参数相同的国内玻璃牌号为 HWS6、IRG206 和 NBU-IR5。

表 1 列出了红外材料的温度特性参数。普通红外材料 Ge 的折射率温度系数为  $400 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}^{-1}$ , ZnSe 的折射率温度系数为  $61 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}^{-1}$ , 而硫系玻璃 IRG206 的折射率温度系数为  $32 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}^{-1}$ 。因此,通过在长波红外光学系统的无热化设计中引入硫系玻璃,可使由温度变化造成的光学系统离焦量减小。所以在光学系统中使用硫系玻璃对于简化系统结构、减轻重量、降低成本等方面均具有重要意义。

表 1 红外材料的温度特性参数

材料	折射率	热膨胀系数 $\alpha_g / ^\circ\text{C}^{-1}$	折射率温度系数 $\frac{dn}{dT} / ^\circ\text{C}^{-1}$
Ge	4.0026	$61 \times 10^{-7}$	$400 \times 10^{-6}$
ZnSe	2.4381	$57.5 \times 10^{-7}$	$61 \times 10^{-6}$
ZnS	2.1998	$78.5 \times 10^{-7}$	$50 \times 10^{-6}$
IRG206	2.7776	$207 \times 10^{-7}$	$32 \times 10^{-6}$

## 2 设计实例

### 2.1 设计指标

本文针对目前广泛应用的  $640 \times 512$  元非制冷型红外探测器进行光学系统设计。该探测器的像元尺寸为  $12 \mu\text{m} \times 12 \mu\text{m}$ , 响应波段为  $8 \sim 12 \mu\text{m}$ 。表 2 列出了这种光学系统的设计参数。

表 2 光学系统的技术指标

参数	技术指标
探测器像元数	$640 \times 512$
像元尺寸	$12 \mu\text{m}$
响应波段	$8 \sim 12 \mu\text{m}$
$F$ 数	1.0
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

在长波红外光学设计中, 常用的材料有 Ge、ZnS、ZnSe 等几种。由于这种系统的视场要求为  $40^\circ \times 32.5^\circ$  (视场比较大), 在光学设计的像差校正过程中需引入非球面和衍射面, 用于轴外像差校正以及不同温度条件下的无热化设计。

图 1 所示为采用常用红外材料设计的无热化系统。该系统由五片透镜组成, 其材料分别为 Ge、Ge、ZnS、ZnSe、ZnSe。系统中, 第一、第二、第三、第五透镜均为非球面透镜, 其中第一、第三透镜的非球面基底上分别增加了衍射面, 以形成用于校正系统轴外像差及色

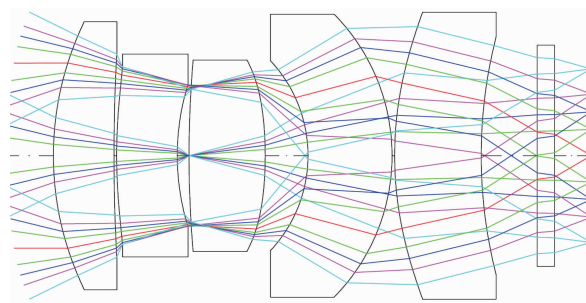


图 1 采用常用材料设计的系统光路图

差的衍射非球面。

图 2、图 3、图 4 分别为采用常用材料设计的系统在  $20^\circ\text{C}$ 、 $-55^\circ\text{C}$ 、 $70^\circ\text{C}$  温度下的 MTF 图。该系统在  $20^\circ\text{C}$  和  $-55^\circ\text{C}$  时的全视场 MTF 均大于 0.3, 在  $70^\circ\text{C}$  时的全视场 MTF 均大于 0.2。

为减少系统的透镜数量和降低系统成本, 设计中将第二透镜的材料由 Ge 改为硫系玻璃 IRG206 (NBU-IR5, HWS6), 并去掉透镜三。将系统由五片式结构改为四片式结构, 然后重新进行优化。最终设计的系统由四片透镜组成 (见图 5), 其材料分别为 Ge、IRG206、ZnSe、ZnSe。系统中, 第一、第三透镜均为非球面透镜, 其中第三透镜的非球面基底上增加了衍射面 (形成衍射非球面)。该系统的光学总长度 (第一片透镜的前表面至成像面) 为 40 mm, 透镜的总重量为 35 g。

与前述利用常用材料设计的系统相比, 采用硫系玻璃后, 透镜数量由原来的五片减为四

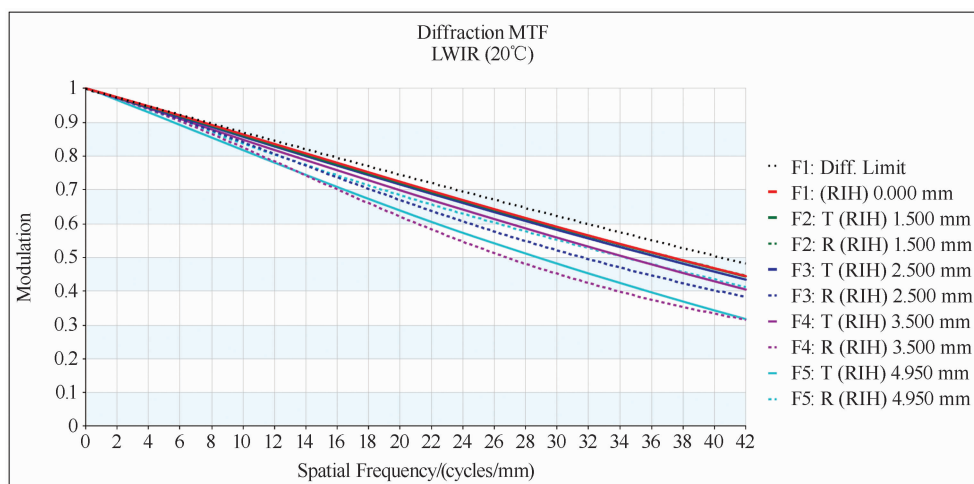


图 2 采用常用材料设计的系统在常温  $20^\circ\text{C}$  时的 MTF 图

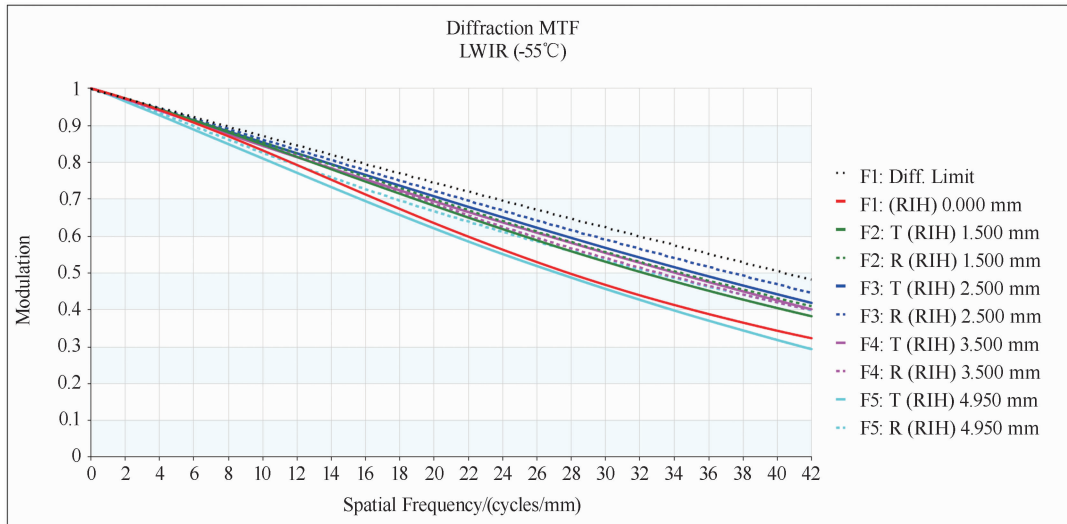


图3 采用常用材料设计的系统在-55℃时的MTF图

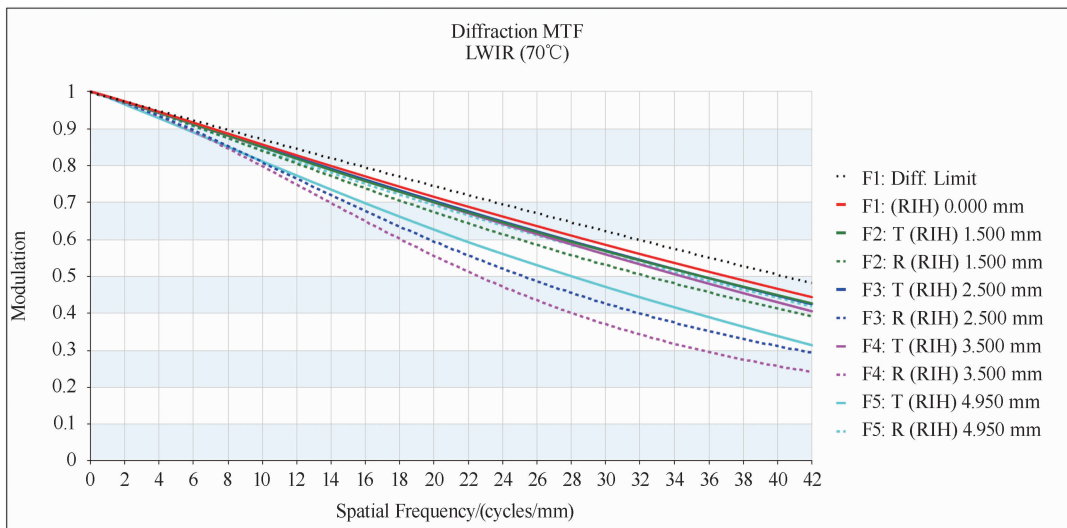


图4 采用常用材料设计的系统在70℃时的MTF图

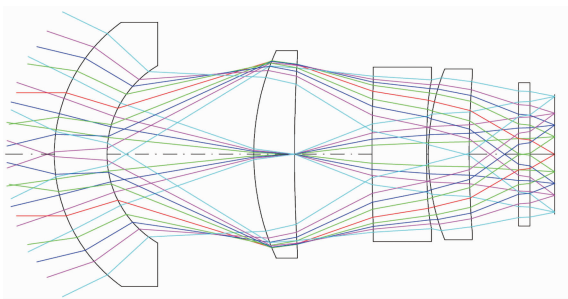


图5 采用硫系玻璃与常用材料组合设计的系统光路图

片,非球面由原来的四个减为三个,衍射面由原来的两个减为一个。

图6、图7和图8分别为采用硫系玻璃与常用材料组合设计的无热化光学系统在20℃、

-55℃和70℃温度下的MTF图。可以看出,这种系统在不同温度条件下的全视场MTF均大于0.3,表明该系统成像性能良好,能够满足工程应用需求。

这种光学系统的衍射艾里斑直径为 $2.44\lambda F^\# = 2.44 \times 10 \times 1 = 24.4 \mu\text{m}$ 。图9、图10和图11分别为采用硫系玻璃与常用材料组合设计的无热化光学系统在20℃、-55℃和70℃温度下的点列图。可以看出,该系统边缘视场的均方根(Root Mean Square, RMS)弥散斑直径的最大值为 $24.4 \mu\text{m}$ ,弥散斑直径与艾里斑直径相当,因此满足应用要求。



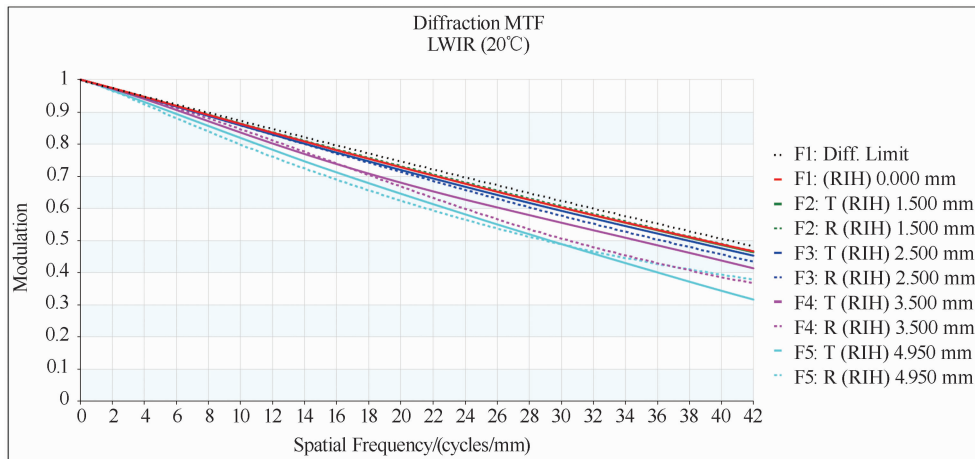


图 6 采用硫系玻璃与常用材料组合设计的系统在常温 20°C 时的 MTF 图

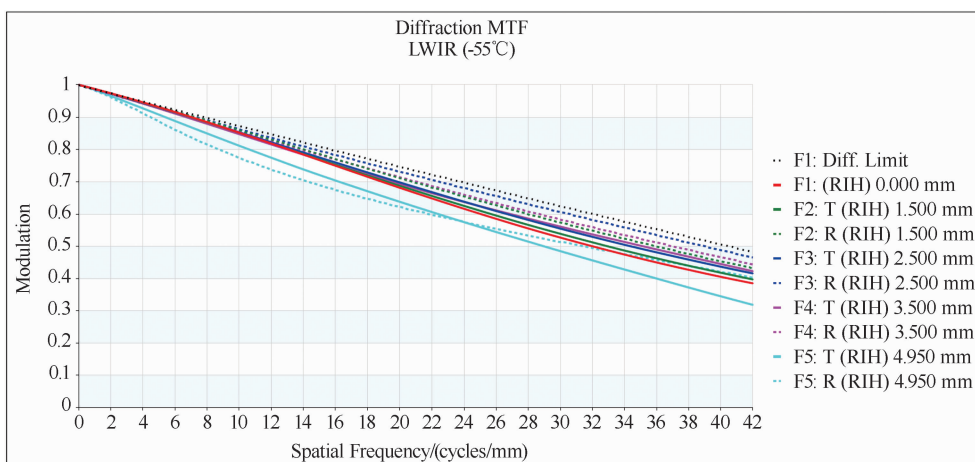


图 7 采用硫系玻璃与常用材料组合设计的系统在 -55°C 时的 MTF 图

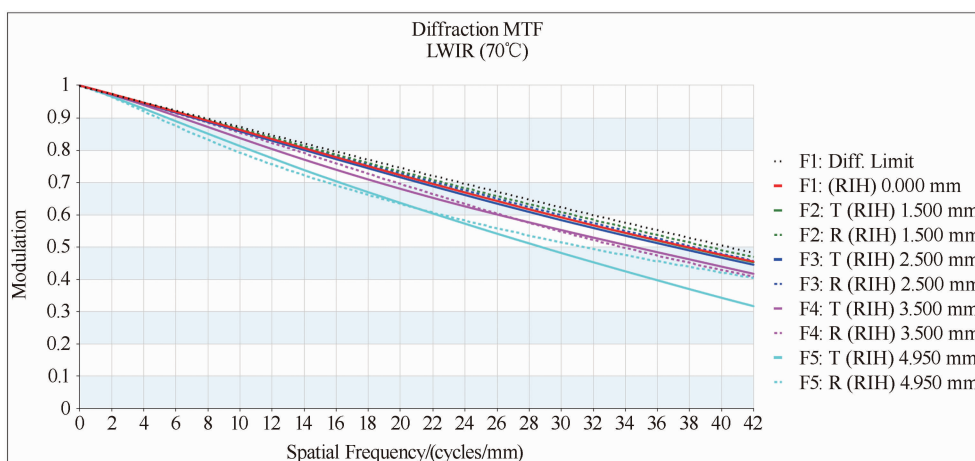


图 8 采用硫系玻璃与常用材料组合设计的系统在 70°C 时的 MTF 图

图 12 为采用硫系玻璃与常用材料组合设计的无热化光学系统的场曲与畸变图。可以看出, 该系统 0.7 视场的畸变小于 1.3%, 边缘视场的畸变小于 3%, 满足系统使用要求。

通过对光学系统各透镜及镜筒的公差分配, 使整个光学系统的公差灵敏度降至较低值, 从而更好地保障产品的性能。图 13 所示为这种系统的公差曲线。

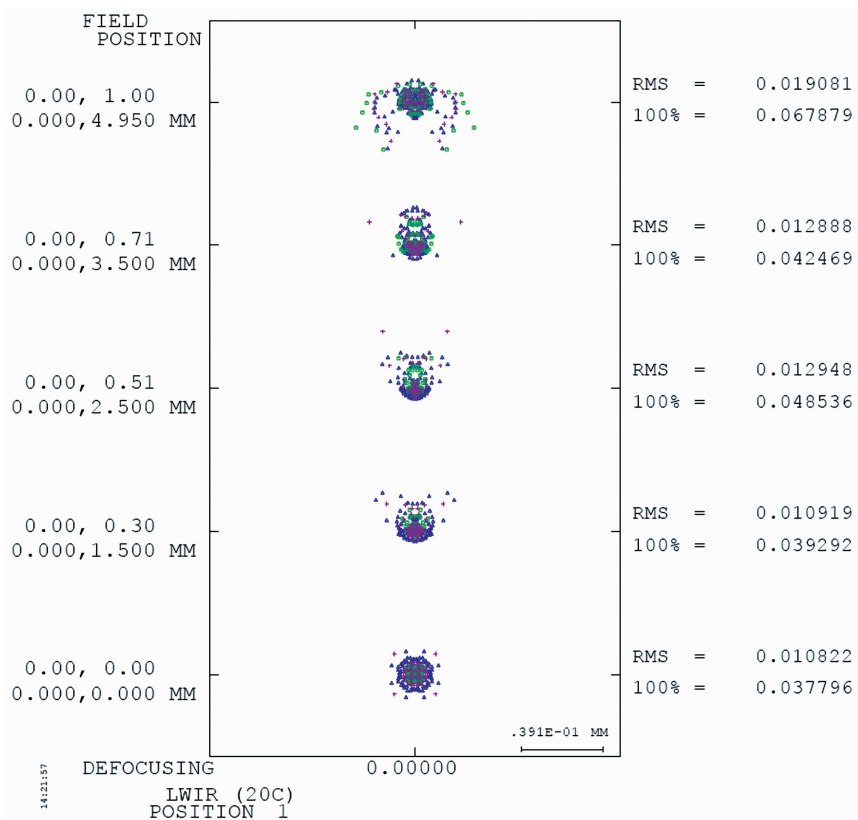


图 9 采用硫系玻璃与常用材料组合设计的系统在常温 20°C 时的点列图

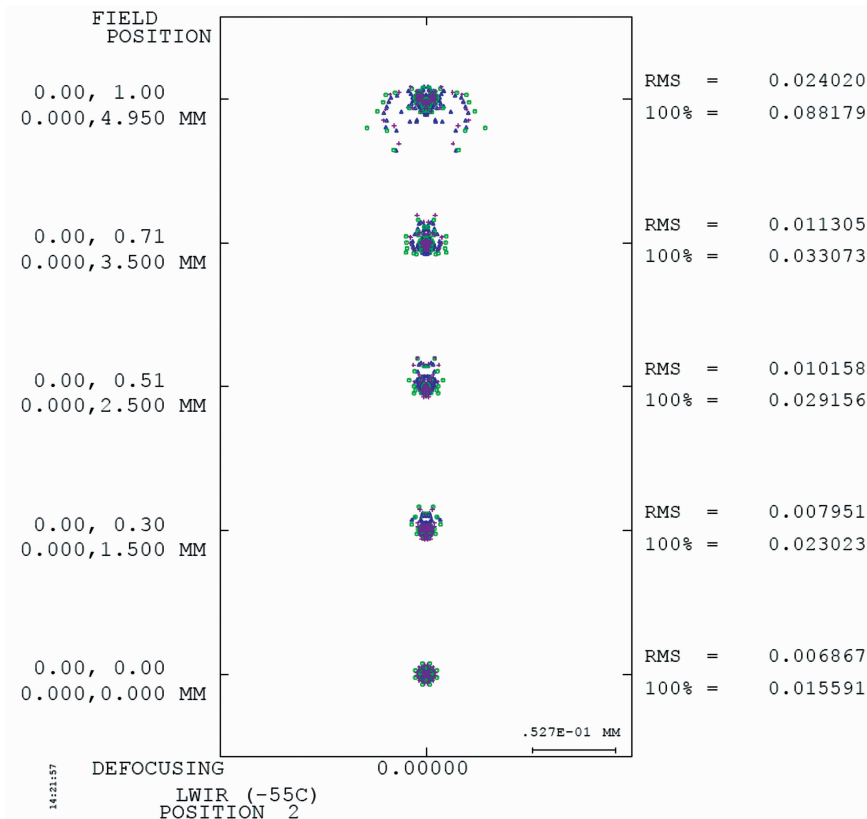


图 10 采用硫系玻璃与常用材料组合设计的系统在 -55°C 时的点列图

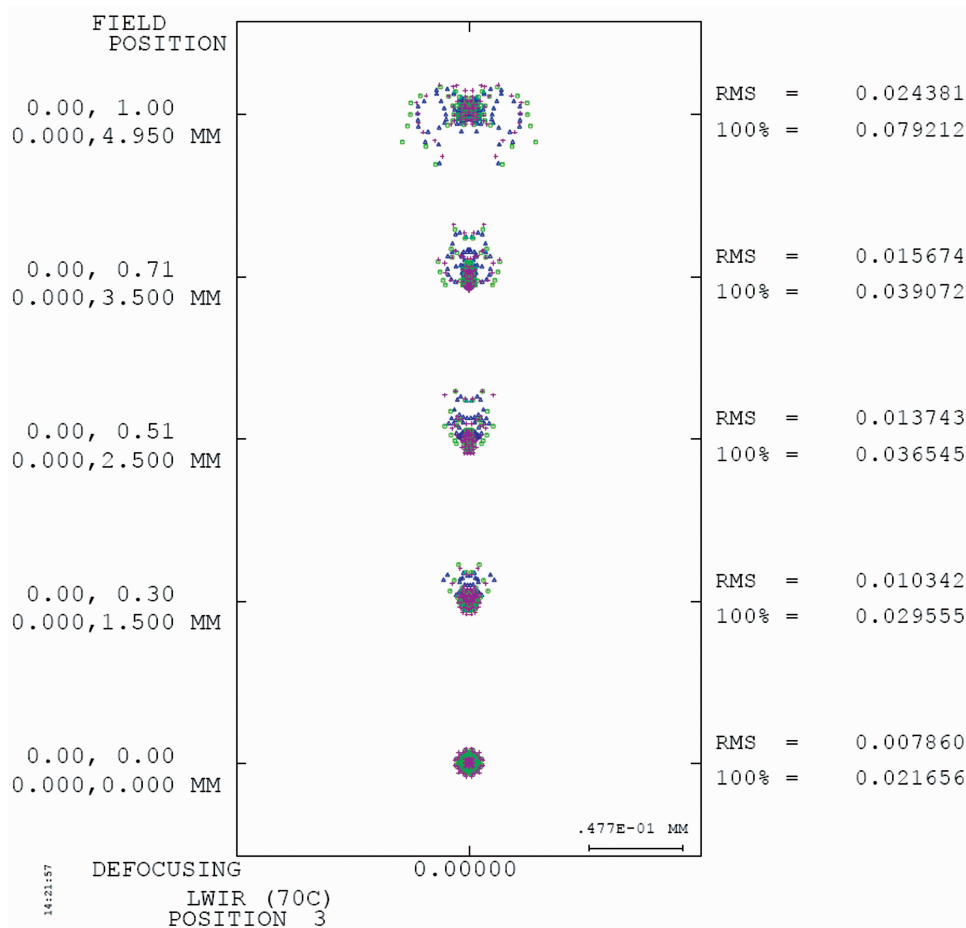


图 11 采用硫系玻璃与常用材料组合设计的系统在 70°C 时的点列图

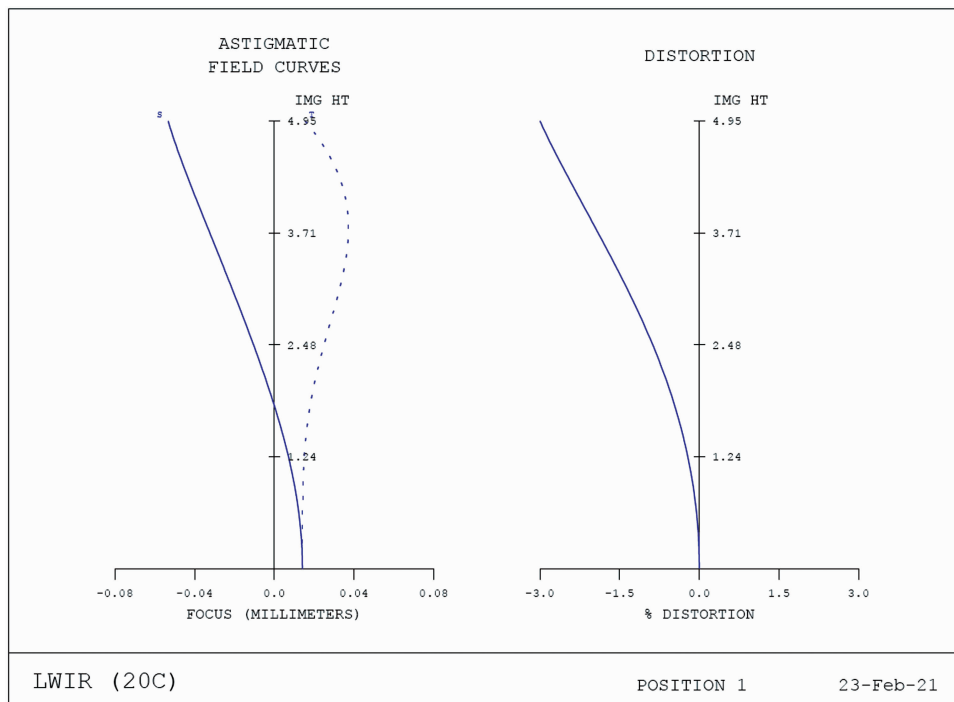


图 12 采用硫系玻璃与常用材料组合设计的系统的场曲与畸变图

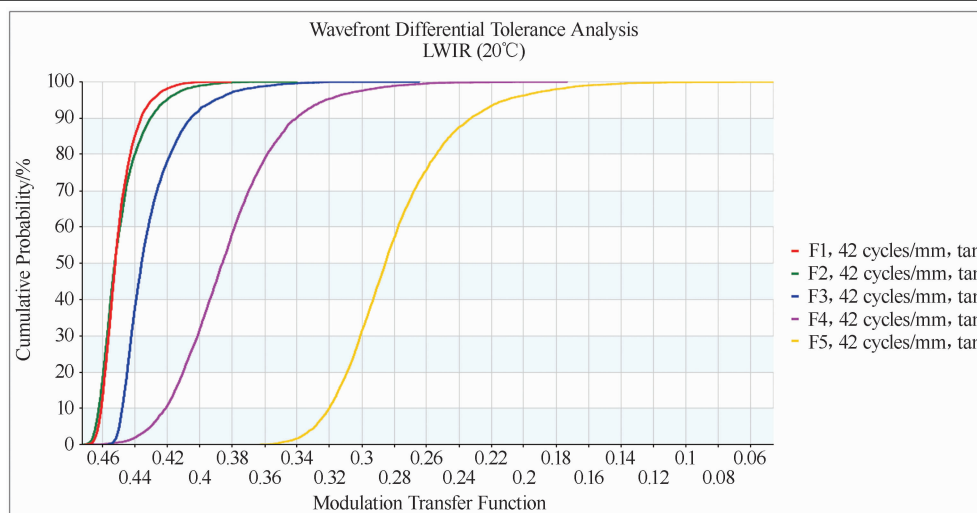


图 13 采用硫系玻璃与常用材料组合设计的系统的公差曲线

主要公差设定值如下：光圈为 3，局部光圈为 0.5，透镜厚度误差为  $\pm 0.02$  mm，透镜间隔误差为  $\pm 0.02$  mm，表面偏心为  $\pm 0.02$  mm，表面倾斜为  $\pm 0.02$  mm，透镜偏心为  $\pm 0.02$  mm，透镜倾斜为  $1'$ 。

经过公差分析，在上述公差范围内，光学系统中心视场在 42 lp/mm 处的 MTF 超过 90% 以上的概率可达到 0.40；0.7 视场在 42 lp/mm 处的 MTF 超过 90% 以上的概率可达到 0.35；边缘视场在 42 lp/mm 处的 MTF 超过 90% 以上的概率可达到 0.28。

### 3 结论

本文对硫系玻璃在宽温红外光学系统无热化设计中的应用进行了研究。针对目前广泛使用的像元尺寸为  $12 \mu\text{m}$  的  $640 \times 512$  元非制冷长波红外探测器，设计了一种可在  $-55 \text{ }^\circ\text{C} \sim +70 \text{ }^\circ\text{C}$  宽温范围内工作且视场为  $40^\circ \times 32.5^\circ$  的非制冷长波红外成像光学系统。该系统结构简单紧凑、体积小、重量轻、成像性能良好，在安防监控、车载夜视等领域具有良好的应用前景。下一步的研究重点是将硫系玻璃应用在适应于新型  $1024 \times 768$ 、 $1280 \times 1024$  等高分辨率、大靶面红外探测器的无热化光学系统中。

### 参考文献

- [1] 雷述宇, 方辉, 刘俊, 等. 国产  $640 \times 512$  非制冷氧化钒红外焦平面探测器的研制 [J]. 红外技术, 2013, 35(12): 759-763.
- [2] 李煜, 方辉, 谭果. 高性能  $17 \mu\text{m}$  非制冷氧化钒红外焦平面探测器的研制 [J]. 红外技术, 2017, 39(9): 785-797.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 吴海清, 曾宪宇, 王朋. 微型长波红外无热化光学系统设计 [J]. 红外, 2019, 40(3): 1-5.
- [7] 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.