

文章编号: 1672-8785(2022)09-0001-09

基于光轴稳定性优化的机载高分辨率 近红外光学系统设计研究

王 茜 刘 洋 杜 赛 王 晶 彭 涛 杨 旭

姚 强 蒲 彬 范成博 王德胜

(西南技术物理研究所, 四川 成都 610041)

摘 要: 针对一些光轴稳定性要求较高的高空使用战斗机挂载光电系统, 分析了光学系统设计中提高光轴稳定性的几点要素, 给出了消热差公式的条件, 推导了景深公式, 并给出了四种提高途径: 采用较大温差范围的光学全被动补偿无热化设计、降低公差灵敏度、提高结构件的刚度和强度、使用景深调焦机构(满足较大作用距离的机载高低空使用要求)。介绍了一种小型机载近红外无热化变焦系统的设计思路。该系统采用光学补偿, 有 4 个透镜组(最后一组为景深调焦机构), 在 $-55\sim 70^{\circ}\text{C}$ 温度范围内均具有较好的像质、较宽松的公差特性和较好的光轴稳定性。

关键词: 近红外光学系统; 景深调焦; 无热化; 光轴稳定性; 光学设计

中图分类号: TN216 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2022.09.001

Research on Design of Airborne High-Resolution Near-Infrared Optical System Based on Optimization of Optical Axis Stability

WANG Qian, LIU Yang, DU Sai, WANG Jing, PENG Tao, YANG Xu,

YAO Qiang, PU Bin, FAN Cheng-bo, WANG De-sheng

(Southwest Institute of Technical Physics, Chengdu 610041, China)

Abstract: In view of the photoelectric system of some high-altitude fighter aircraft with high requirement of optical axis stability, several elements to improve the stability of optical axis in the design of optical system are analyzed, and the condition of heat dissipation formula is given in this paper. The formula of depth of field is deduced, and four ways to improve the stability of optical axis are obtained. The design of optical full passive compensation without heating in large temperature range, the reduction of tolerance sensitivity, the improvement of stiffness and strength of structural parts and the use of field depth focusing mechanism meet the requirements of airborne high and low space use with large working distance. In addition, the design idea of a miniaturized airborne NIR athermal zoom system is introduced. The optical compensation and four lens groups are used in the system. The last group is the depth-of-field focusing mechanism. The system has good image quality, loose tolerance characteristics and good optical axis stability in the temperature range from -55°C to 70°C .

收稿日期: 2022-04-10

作者简介: 王茜(1982-), 女, 广西阳朔人, 高级工程师, 主要从事光学设计仿真及性能评估方面的研究。

E-mail: 16544841@qq.com

Key words: near-infrared optical system; focusing mechanism for depth of field; athermalization; optical axis stability; optical design

0 引言

当战斗机挂载多功能光电瞄准设备进行高空突防和执行作战任务时,受飞行高度以及季节温差的影响,光电设备所处的环境温度变化非常大。机载光电观瞄系统体积空间有限,无法安装大型温控设备,舱内温度得不到有效控制,因此温度变化差异较大。由于光电观瞄系统的近红外/中波红外通道要结合激光器测距使用,所以对该系统的光轴稳定精度要求特别高。而温度的影响不但导致高低温焦面位置的漂移,而且导致光轴的移动。

由于光学材料本身具有的 dn/dt (即折射率随温度的变化)导致高温或低温情况下焦面位置漂移及图像模糊,因此必须进行无热化设计。光学系统无热化设计的方法一般有以下三种:光学被动式、机械主动式和机械被动式^[1-6]。其中,机械主动式和机械被动式消热差会导致变焦机构行程加长,进而加大光轴的偏移量,使光轴的偏移更加难以控制。而采用光学被动式消热差则可获得更加稳定的系统。

此外,降低系统公差灵敏度也能减小光轴的偏移量。在高低温下,镜片轴向或微小的倾斜对光轴偏移产生的微弱影响,也是控制整个系统光轴偏移量的重要因素。

因为机载观瞄设备受飞机飞行包络的影响,有近距离观察的要求,所以在 700 m 至无穷远的范围内需保证清晰成像。受景深影响,长焦距的定焦光学系统需加装微调焦机构,从而兼顾近距离成像。

机载远程观测设备采用 $0.65\sim 0.9\ \mu\text{m}$ 近红外波段,有益于减轻杂散光的影响。太阳是个强大的辐射体,其辐射度的最大值在波长 $0.47\ \mu\text{m}$ 处,而辐射能的 46% 处在 $0.4\sim 0.7\ \mu\text{m}$ 可见光波段。因此,选择近红外波段有利于避开太阳杂散光最强的能量波段。近红外波段

的透雾能力较强,具有较高的大气透过率,在黄昏等低照度条件下也可以使用,有益于实现远距离探测。

为了达到远程观测的高分辨率要求,光学系统必须采用 1280×1024 全局快门的互补金属氧化物半导体 (Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS) 图像传感器,实时动态观测静止目标或移动目标。因为所选波段为近红外波段,所以采用黑白模式的 CMOS 图像传感器。相比于同款彩色图像传感器,黑白探测的图像传感器在芯片的像元上不需要分光,探测灵敏度要高 3 倍,高信噪比也更加适合探测远距离弱小目标。

1 光学系统的设计理论

1.1 光学系统的消热差理论

透镜的几何尺寸和材料的折射率共同决定了它的焦距^[7-8],即

$$\frac{1}{f_0} = (n-1)\left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right] + \frac{(n-1)^2 d}{nr_1 r_2} \quad (1)$$

式中, r_1 和 r_2 为透镜表面的曲率半径; d 为透镜的厚度。当 $d\rightarrow 0$ 时,由式(1)得到薄透镜公式:

$$\varphi_0 = \frac{1}{f_0} = (n-1)\left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right] \quad (2)$$

焦距随温度变化时可采用以下参数:

$$V = \alpha L - \frac{1}{n-1} \frac{\partial n}{\partial T} (\text{K}^{-1}) \quad (3)$$

式中, α 为线膨胀系数; L 为镜筒的总长度; $\partial n/\partial T$ 表示折射率随温度的变化。

焦距随温度的变化量为

$$\Delta f'_T = f'_0 V \cdot \Delta T \quad (4)$$

式中, ΔT 为温差。

透镜组的温度补偿(即消热差效应)需满足:

$$V_\varphi = \sum_{i=1}^k V_i \varphi_i \rightarrow 0 \quad (5)$$

式中, φ_i 为每个透镜的光焦度。

1.2 光学系统的景深理论

光学系统中物镜可以清晰成像的最短距离为

$$L_{\min} = \frac{F^2 D}{F^2 + f^\# \mu D} \quad (6)$$

式中, F 为物镜焦距; D 为成像距离; $f^\# = F/A$, A 为入瞳直径; μ 为像元尺寸。多数情况下成像距离都在米级甚至千米级, 而焦距多为毫米级, 所以 $D \gg F$, $F/D \rightarrow 0$, 进而可认为 $F^2/D \rightarrow 0$ 。因此式(6)可以改写为

$$L_{\min} = \frac{F^2}{\frac{F^2}{D} + f^\# \mu} \approx \frac{F^2}{f^\# \mu} \quad (7)$$

2 光学系统设计指标

光电系统的设计指标关系到探测和识别的距离。根据总体的作用距离指标要求, 按照光学系统几何成像公式和分辨率公式可以算得光学系统的焦距为 308 mm, 相对孔径为 1:4.9。所用 0.65~0.9 μm 近红外波段具有更强的透水汽、透雾能力。由于选择的是近红外波段, 只能采用黑白模式的图像传感器。彩色图像传感器一个像元面积要切割为 RGB 三色光的几块面积, 灵敏度随着感光面积的减小而下降, 因此黑白模式图像传感器的灵敏度更高。为了缩小镜头的体积, 同时兼顾系统分辨率, 采用 4.2 $\mu\text{m} \times 4.2 \mu\text{m}$ 像元大小以及 1280 $\times$ 1024 像元数。飞机在空中的运动速度较快, 机载设备的图像传输频率至少要在 50 Hz 以上, 图像才不会有显示上的拖尾现象。飞机在高空作业时, 成像设备的环境温度一般随着飞行高度的增加而降低; 而在低空飞行时, 若长时间使用设备所产生的热量散不出去, 则周围的环境温度较高。因此, 光学镜头和图像传感器需同时满足在 -55~70 $^{\circ}\text{C}$ 的环境温度范围内可以使用。在某些场景(如阳光强烈或包含建筑物阴影)下, 图像对比度反差较大, 则要求图像传感器的动态范围大于 60 dB。而在低照度(如阴天或黄昏)条件下成像时, 则要求图像传感器的灵敏度低于 0.01 lux。

经过以上分析计算可得, 该光电系统的光

学系统设计指标如下: 工作波段为 0.65~0.9 μm ; 相对孔径为 1:4.9; 焦距为 308 mm; 无热化温度范围为 -55~70 $^{\circ}\text{C}$; 景深调节范围为 700 m~ ∞ ; 镜头长度小于等于 210 mm。

图像传感器指标如下: 像元数为 1280 $\times$ 1024; 像元尺寸为 4.2 $\mu\text{m} \times 4.2 \mu\text{m}$; 图像帧频为 50 fps; 图像灵敏度小于 0.01 lux; 动态范围大于 60 dB; 输出位宽为 8 bit; 数据接口为双 Tap Camera Link Base; 控制接口为 RS422; 曝光时间调节范围为 0.01~100000 ms; 图像预处理包括图像镜像、透雾增强、中心十字丝; 增益调节为手动可调(0~400 档位)/自动增益; 供电电压为直流额定 12 V(9~15 V 可接受); 具有在线升级功能, 即通过 422 接口接收升级程序包, 并完成在线升级(注: 不是串口烧写)。

3 光学系统方案

采用 CODE V 软件进行光学系统设计和热建模分析。光学镜头采用 4 组共 9 片胶合透镜组成的透射式一次成像光学系统(见图 1), 最后一组胶合透镜为微调焦透镜组。

表 1 光学系统设计参数表

透镜面	半径	空气间隔	材料
1	—	5.18	H-K9L
2	—	5	
3	61.55	6.21	H-ZBAF50
4	82.08	9.22	H-QK3L
5	2066.09	0.72	
6	—	0.50	Stop
7	67.44	14.16	H-ZF11
8	-78.57	3.5	H-ZF3
9	25.75	11.01	H-BAK2
10	79.05	4.69	
11	-105.02	7.40	H-FK61
12	-34.07	3.5	H-QK3L
13	254.56	72.58	
14	-27.48	3.5	H-BAK2
15	11.24	6.84	H-QF1
16	-49.50	0.5	
17			像面

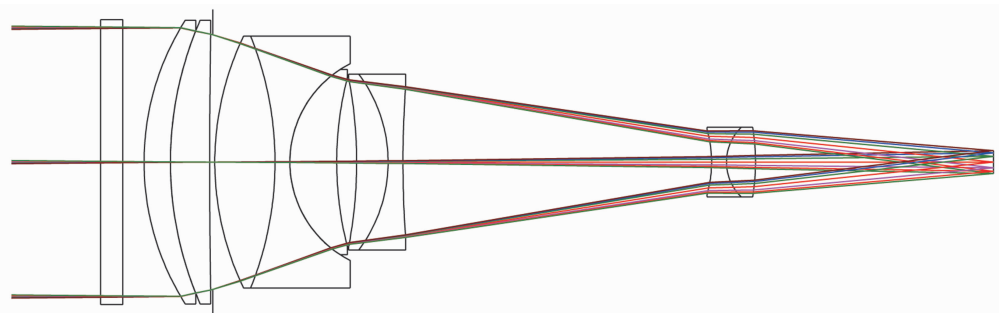


图 1 光学系统示意图

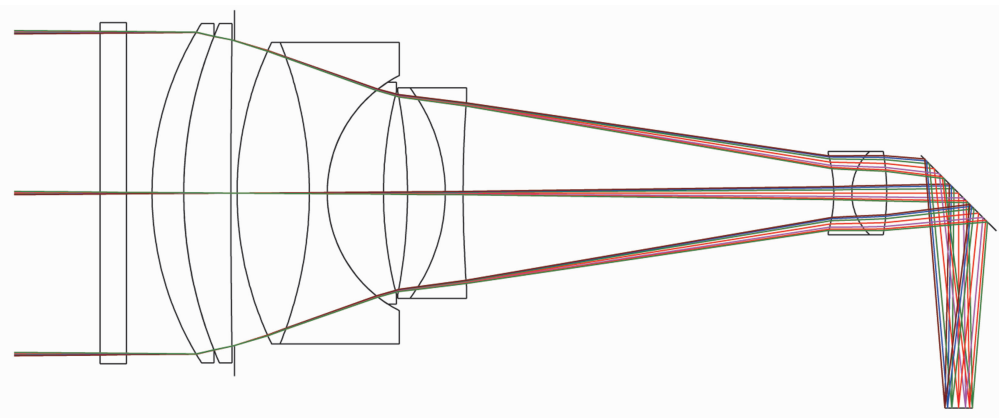


图 2 光学系统折转示意图

如表 1 所示, 为了消热差, 选择 H-QK3L 和 H-FK61 等具有负 dn/dt 的材料作为正透镜, 以补偿系统温度变化引起的光程差; 同时使用正 dn/dt 材料(如 H-BAK2)作为负透镜, 以减小温度导致的系统光焦度变化。消热差的设计步骤如下: (1) 计算规定的最高温度和最低温度的空气折射率。(2) 在给定的温度和波长条件下, 将光学材料相对于空气的相对折射率转换为绝对折射率, 即乘以空气的折射率。(3) 根据光学材料厂家提供的 dn/dt 值, 算出玻璃在最高/最低温度条件下的绝对折射率。(4) 根据具体透镜的光焦度及阿贝数分配和调整光学材料。(5) 根据已知光学材料的热膨胀系数和尺寸, 仿真最高/最低温度条件下的透镜表面曲率半径。(6) 根据光学材料和机械材料的热膨胀系数和尺寸, 仿真最高/最低温度条件下的空气间隔和零件厚度。(7) 分析系统的焦深, 评价最高/最低温度时最佳聚焦位置是否在焦深范围内, 并对其成像质量进行评价。

由于大部分透镜单独的光焦度都小于 100

mm, 若分开装配, 则公差较为严格。这样不但无法保证像质, 而且也无法保证高低温光轴前后的移动量。因此将透镜组合成胶合透镜, 进而增加胶合透镜组的整体光焦度, 减小透镜与结构件配合的灵敏度。第一组胶合透镜组的光焦度为 119 mm, 第二组胶合透镜组的光焦度为 -576 mm, 第三组胶合透镜组的光焦度为 -157 mm, 第四组胶合透镜组的光焦度为 -153 mm。

微调焦机构采用凸轮进行景深调节。凸轮控制 14~16 面透镜组的前后移动。为留有余量, 其调节行程为 2 mm。由于该透镜组焦距较长(-153 mm), 前后移动这组透镜对光轴影响不大。凸轮的加工采用配做的方式来减小间隙。

为保证整体的刚度和强度, 选用热膨胀系数为 $8.8 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ 的钛合金作为镜筒, 从而减小高低温下由材料热胀冷缩导致的光轴位移量。

由于结构空间有限, 为了缩短长度, 在微调焦机构的后面插入反射镜, 将光路折转。

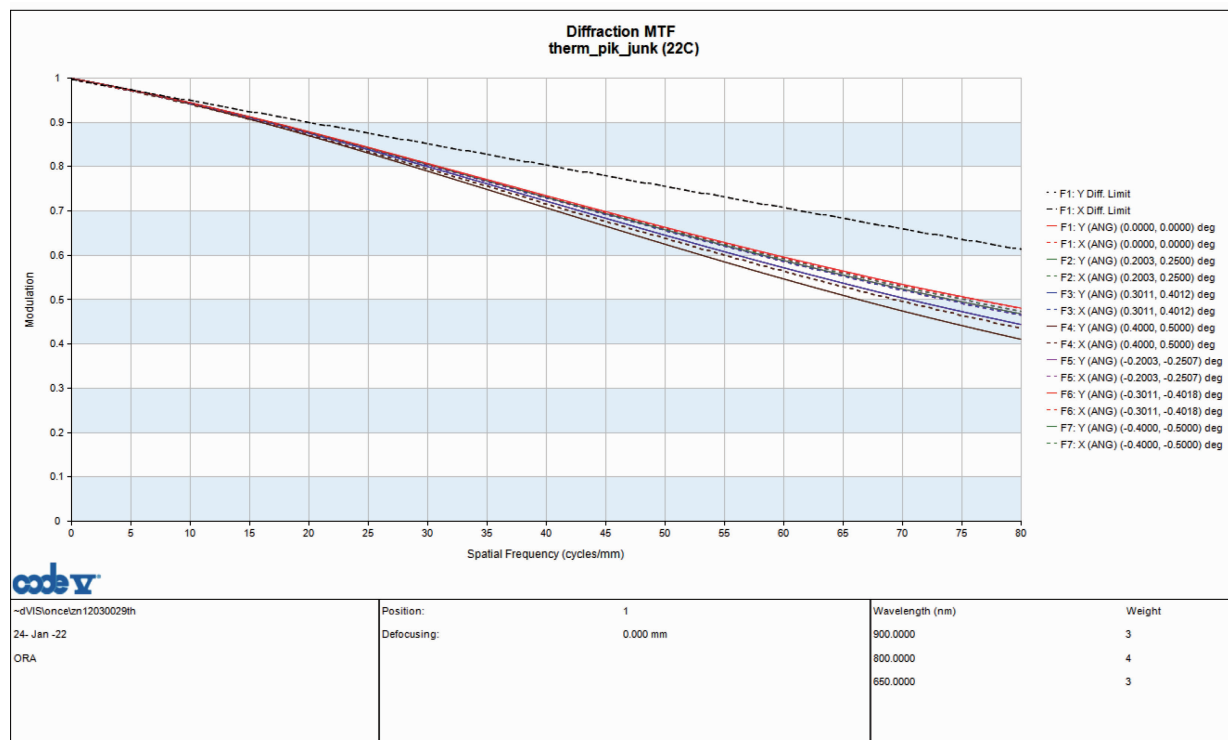


图 3 22℃下的 MTF 曲线

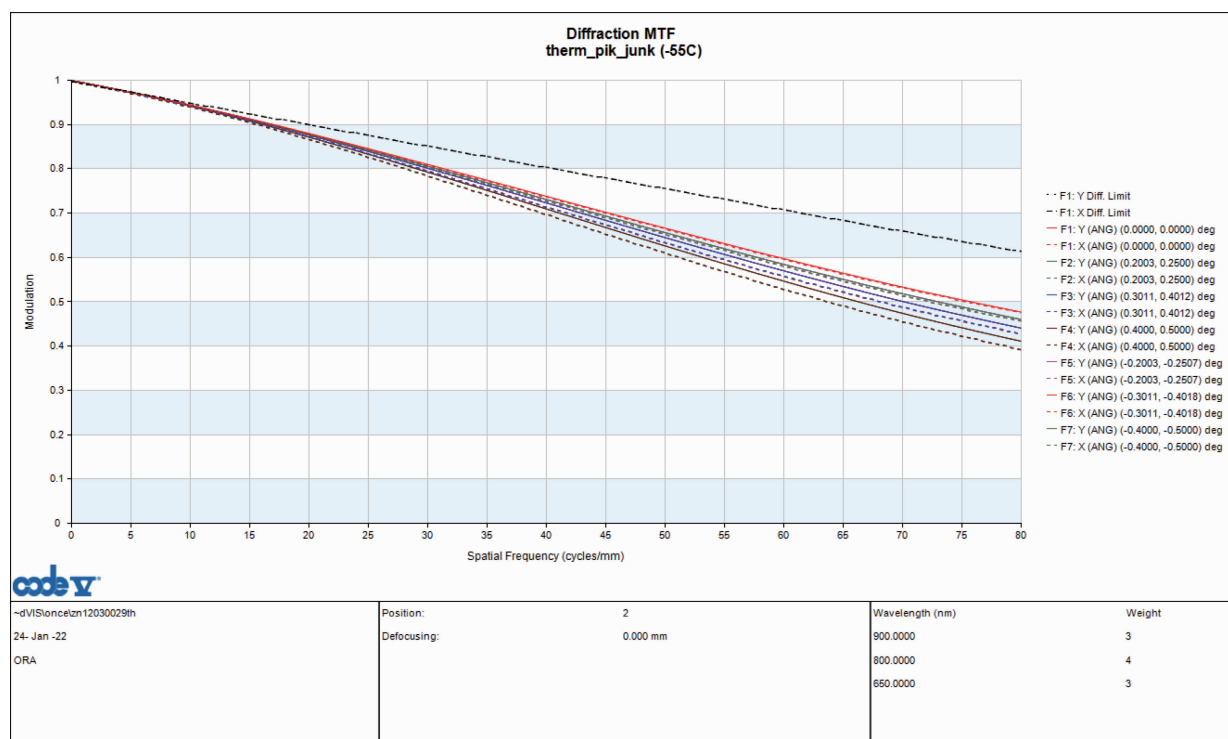


图 4 -55℃下的 MTF 曲线

4 光学系统设计结果

从窗口玻璃到焦面的长度为 210 mm, 口径为 63 mm。图 3~图 5 所示为常温和高低温

下的 MTF 曲线。图 6~图 8 为常温和高低温下的点列图。由 MTF 和点列图可知, 该光学系统在全温范围内的像质能够达到使用要求。

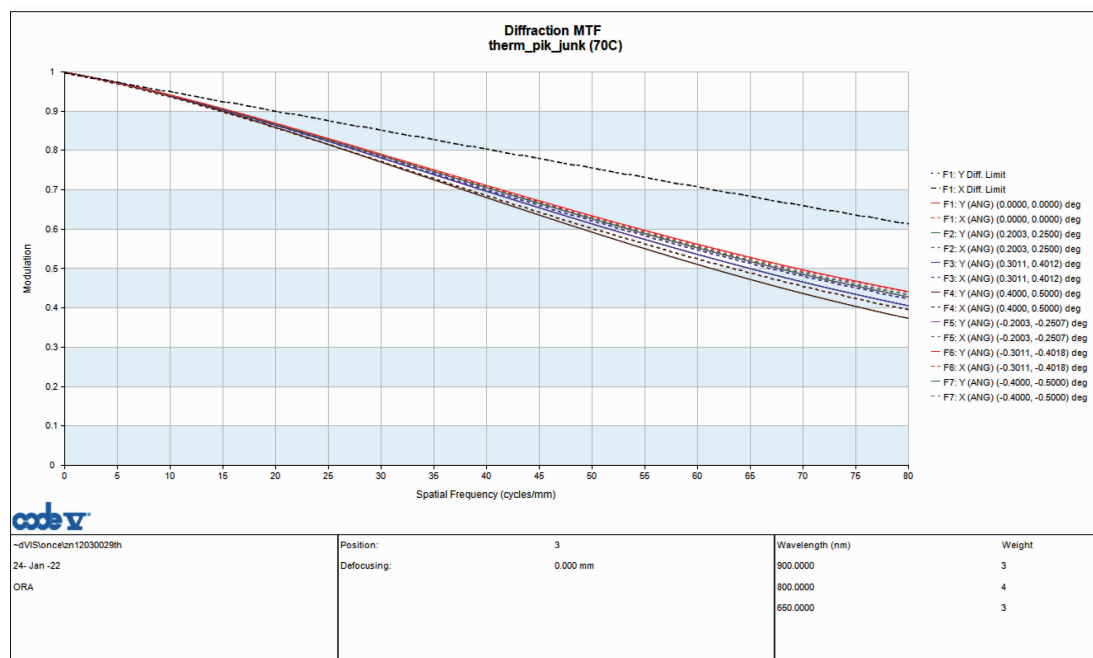


图 5 70℃下的 MTF 曲线

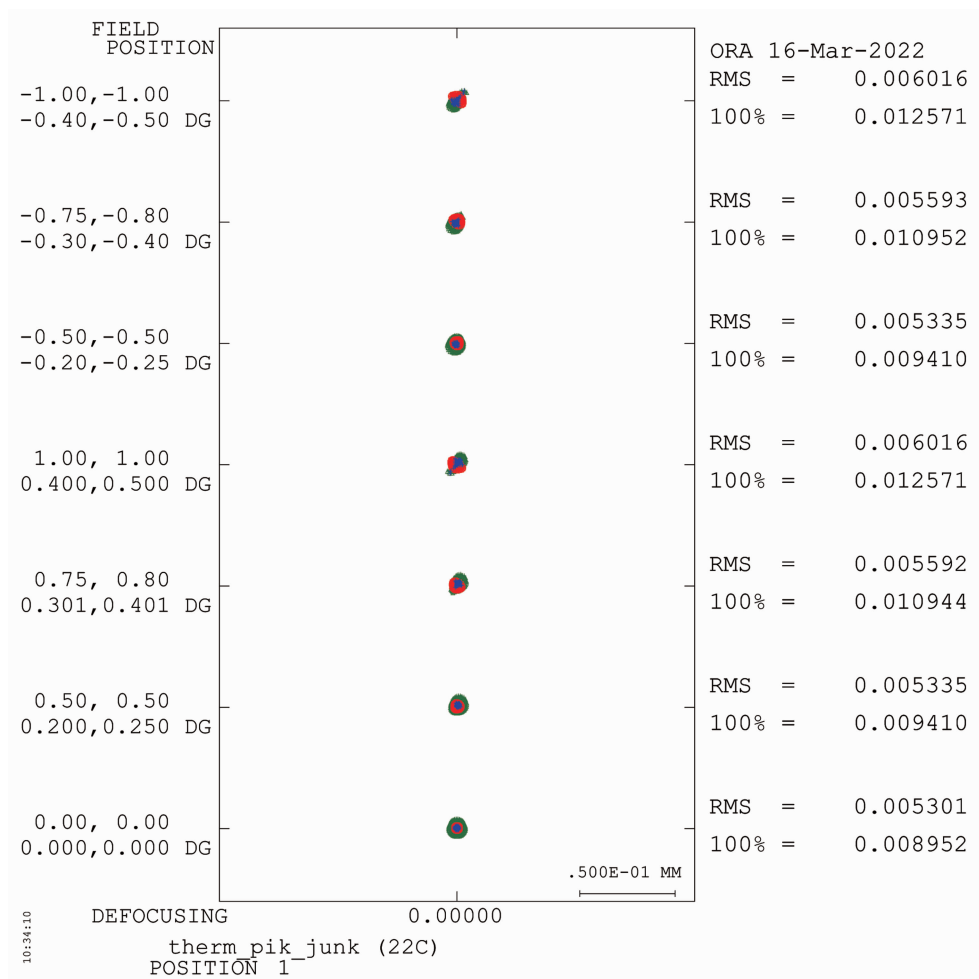


图 6 22℃下的点列图

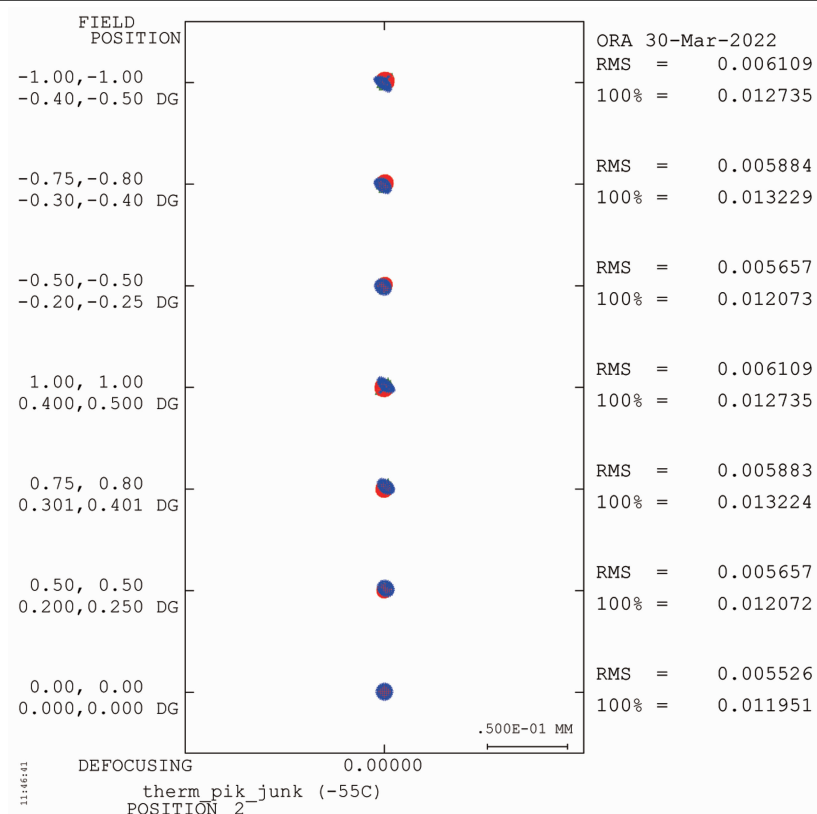


图 7 -55℃下的点列图

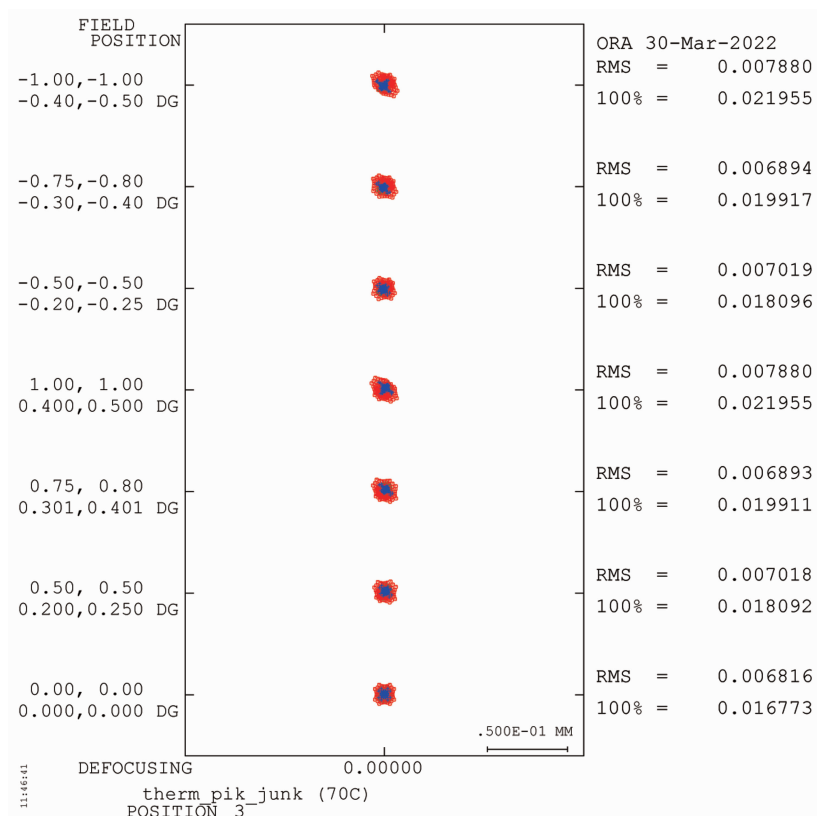


图 8 70℃下的点列图

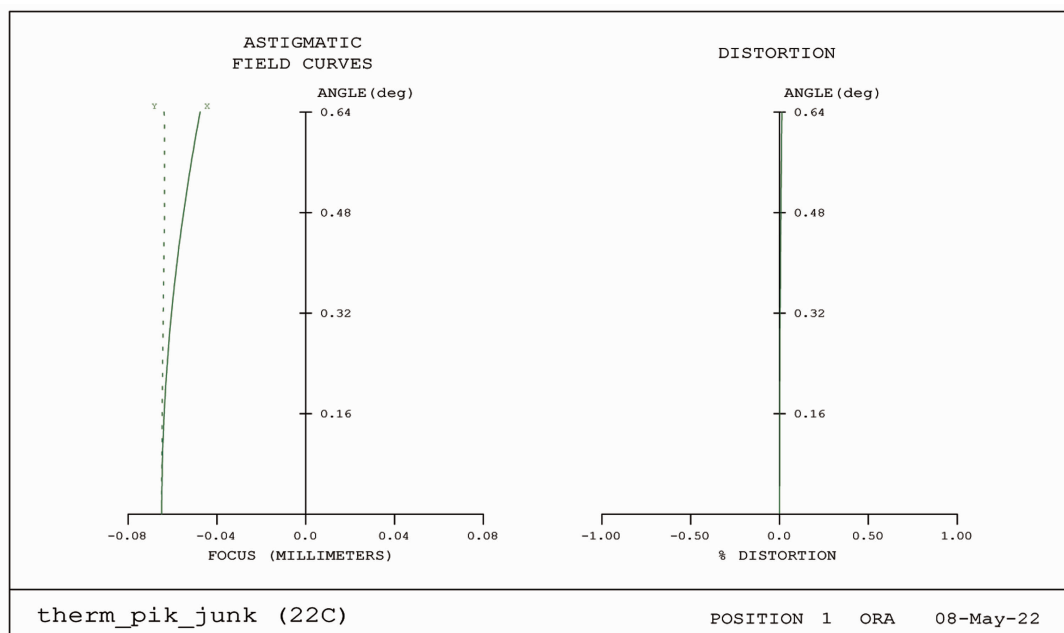


图 9 常温畸变图

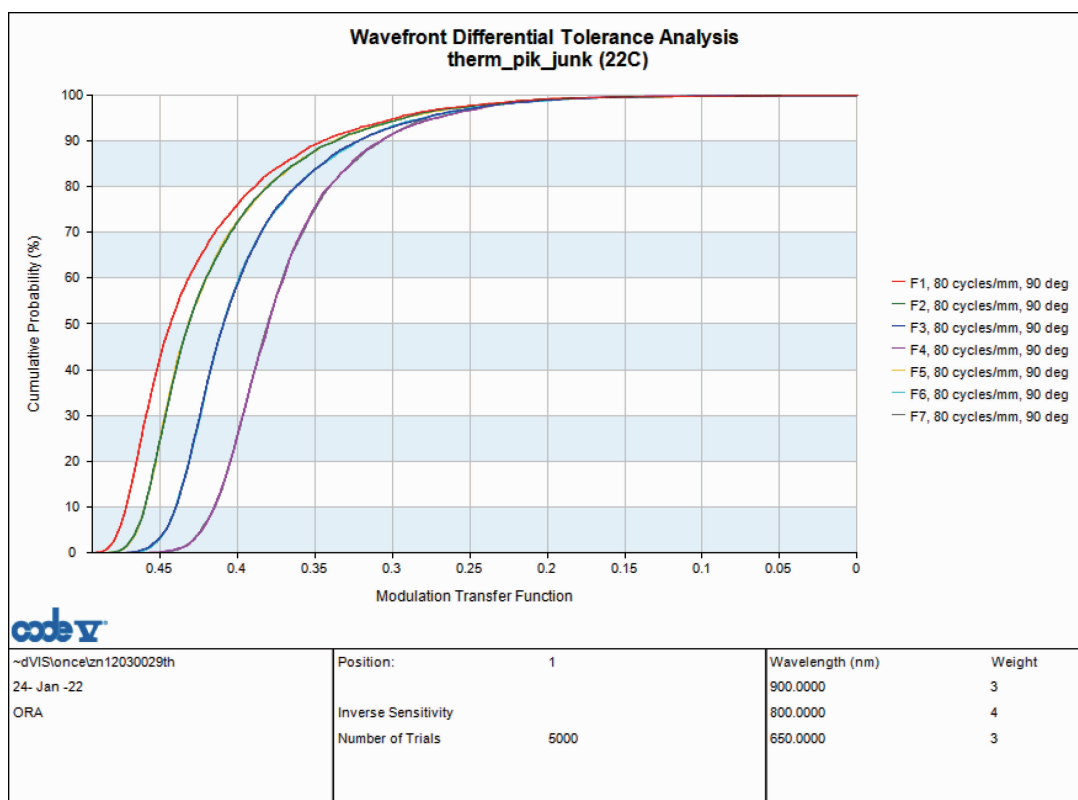


图 10 公差概率曲线

光学材料的折射率、阿贝数等带来的误差以及镜片/镜筒加工、装配误差会导致 MTF 下降。将定心仪装配能够达到的水平作为公差范围，使用 CODE V 软件分析了具体的公差。在 80 cycles/mm 处分析后发现，全视场的

MTF 在 0.3 以上的概率超过 90%。

使用 CODE V 软件分析了本系统的初级鬼像，即二次反射形成的鬼像。保护窗口为平板玻璃。它在探测器上形成的二次反射的弥散斑最小，即能量最为集中。由于该窗口为平面，

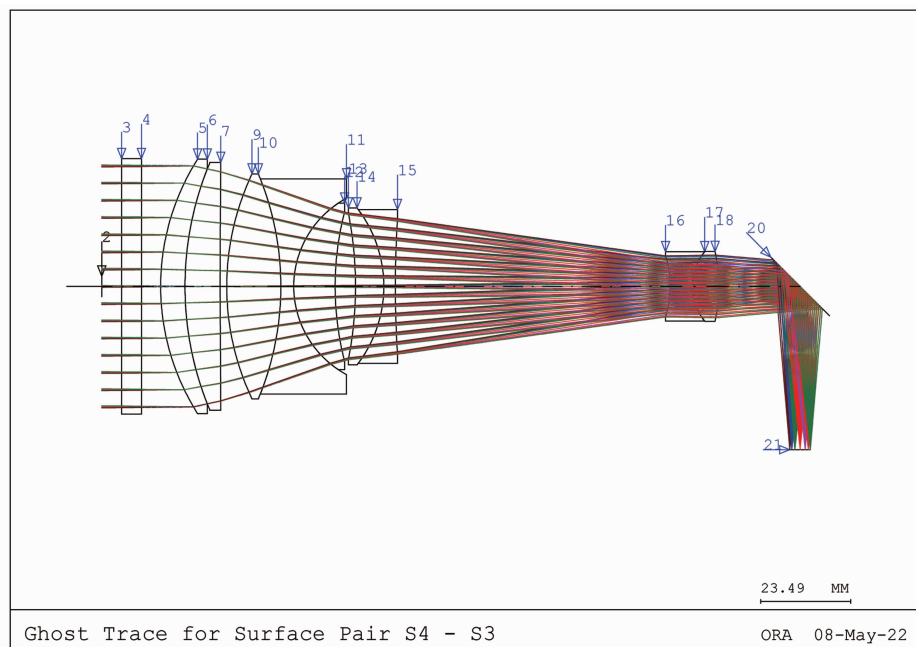


图 11 杂散光分析

通过优化透镜曲率半径、厚度与空气间隔的方式不能将其二次反射的鬼像完全去除。只有通过提高平面保护窗口膜层的透过率来尽量减少膜层剩余反射,从而降低在探测器上形成鬼像的能量。经试验验证,该镜头无明显鬼像产生。

6 结束语

本文对基于光轴稳定性优化的机载近红外高分辨率光学系统设计进行了研究,并分析了影响机载光电设备光轴偏移的几点因素。采用较大温差范围的光学全被动补偿无热化设计、降低公差灵敏度、提高结构件的刚度和强度、使用景深调焦机构,满足了较大作用距离范围的机载高低空使用要求。本文设计了一种小型机载近红外无热化微调焦系统。分析结果表明,该方法获得的机载近红外无热化微调焦系统在较小体积和简单结构下实现了全温度范围内较好的像质、较小的畸变和合理的公差特性,并从光学设计上能够保证现有装配条件下装配好的光学系统光轴在高低温范围内的偏移较小。该方法可应用于类似光学系统的设计与研制。今后可在保证公差特性和光轴稳定性的前提下,尽量减少镜头镜片数量和提高 MTF 值。

参考文献

- [1] 王文生, 牟达. 现代光学系统设计 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2015.
- [2] Cox J A. Application of Diffractive Optics to Infrared Imagers [C]. *SPIE*, 1995, **2552**: 304-312.
- [3] 王春雨, 王聪. 航空相机光学镜头被动消热一体化设计与验证分析 [J]. *红外与激光工程*, 2021, **50**(3): 20200220.
- [4] 廖劲峰, 丁亚林, 姚园. 机载折反式光学系统的无热化设计 [J]. *液晶与显示*, 2019, **34**(1): 39-46.
- [5] Tamagawa Y, Wakabayashi S, Tajime T, et al. Multilens System Design with an Athermal Chart [J]. *Applied Optics*, 1994, **33**(34): 8009-8013.
- [6] Tamagawa Y, Tajime T. Dual-Band Optical Systems with a Projective Athermal Chart: Design [J]. *Applied Optics*, 1997, **36**(1): 297-301.
- [7] 曲锐, 杨建峰, 曹剑中. 水下大视场连续变焦光学系统设计 [J]. *红外与激光工程*, 2021, **50**(7): 20200468.
- [8] 红外热成像 [R]. 天津: 航天工业总公司第三研究院三部/八三五八所, 1994.