

文章编号: 1672-8785(2024)02-0001-08

小型折反式短波红外光学系统设计

吴海清^{1,2} 李同海^{1,2} 谈大伟^{1,2}

(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: 为解决纯折射式光学系统不易实现长焦小型化设计以及纯反射式光学系统不易实现较大视场的技术问题, 采用折反式光学结构形式设计了一种焦距为 500 mm、工作波段为 0.9~1.7 μm 、 F 数为 5 的短波红外成像光学系统。该系统由抛物面主镜、二次曲面次镜以及后组透镜组成, 光学系统总长度小于 138 mm。设计结果表明, 该系统结构紧凑、体积小、成像质量好, 在探测器对应的特征频率 33 lp/mm 处的调制传递函数 (Modulation Transfer Function, MTF) 值大于 0.55, 接近衍射极限。整机装配完成后进行了 MTF 测试及外景成像测试。实际测试结果与设计分析一致, 满足应用需求。

关键词: 短波红外; 小型化; 折反式; 光学系统

中图分类号: O439; TH74 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2024.02.001

Design of Miniaturized Catadioptric Shortwave Infrared Optical System

WU Hai-qing^{1,2}, LI Tong-hai^{1,2}, TAN Da-wei^{1,2}

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

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

Abstract: In order to solve the technical problems that the refraction optical system is not easy to achieve the long focal length miniaturization design and the reflection optical system is not easy to achieve the large field of view, the shortwave infrared imaging optical system with the focal length of 500 mm, the operating band of 0.9–1.7 μm and F number of 5 is designed by using an optical structure with the form of refraction and reflection. The system consists of a parabolic primary mirror, a quadric secondary mirror and a rear set of lenses, with a total optical length of 138 mm. The design results show that the system has a compact structure, small size and good imaging quality. The value of modulation transfer function (MTF) at the characteristic frequency of 33 lp/mm corresponding to the detector is greater than 0.55, which is close to the diffraction limit. MTF test and location imaging test are carried out after the assembly of the whole machine. The actual test results are consistent with the design analysis and meet the application requirements.

Key words: shortwave infrared; miniaturization; catadioptric; optical system

收稿日期: 2023-06-11

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

0 引言

InGaAs 短波红外成像系统的工作波段为 $0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$, 其成像方式与可见光波段相同, 即通过目标反射环境中的短波红外辐射进行成像, 具有对比度高、目标细节清晰等特点, 有利于对目标个体进行识别。当前, 可见光摄像机、红外热像仪以及激光测距/指示器已经成为光电系统的标准配置传感器。短波红外波段位于可见光与中波红外波段之间, 对于多波段目标探测、伪装识别等具有重要意义^[1]。

其次, 短波红外波长比可见光波长长, 大气对前者的散射作用小。因此, 短波红外成像在雾霾、烟尘等不良天气条件下具备与热红外波段相似的大气障碍穿透能力。由于在恶劣气候条件以及战场烟雾环境下的成像效果优于可见光成像, 短波红外与可见光及中波红外成像互补搭配, 可在最大程度上实现全天候适应, 所以在有人和无人操作的机载光电系统的侦察、监视应用中具有重要意义^[2-3]。

此外, 短波红外成像系统的成像波段能够覆盖目前最常用的波长为 $1.064 \mu\text{m}$ 和 $1.54 \mu\text{m}$ 的两种激光器。而现有的可见光摄像机和红外热像仪的成像波段则不涵盖此类激光器, 所以无法观测到利用该波段激光器研制的激光照射器或激光测距机的激光光斑。然而, 短波红外探测器在激光照射器的工作波段 $1.064 \mu\text{m}$ 处的量子效率大于 65% , 因此可对当前光电系统中普遍配置的激光照射器和激光测距机的光斑进行成像。除了观察激光光斑之外, 还可以自动标示激光光斑能量中心的坐标位置, 确认激光照射器的光轴是否有漂移。此外, 短波红外探测器在白天可对目标进行短波侦察与成像, 在目前的作战模式下具有广阔的应用前景。因此, 在机载光电系统中配备短波红外成像组件具有重要意义^[4-5]。

当前, 国外的 L-3 WESCAM、FLIR 等机

载光电系统生产商推出的系列产品中, 短波红外传感器已成为必备的光电成像组件, 用于提高系统的烟雾穿透、伪装识别以及对激光光斑的成像观察能力。图 1 所示为 L-3 WESCAM 公司的 MX-25 光电系统及其短波红外图像^[6]。图 2 所示为 FLIR 公司的 Star SAFIRE® 380-HLD 光电系统及其对激光光斑的成像效果^[7]。

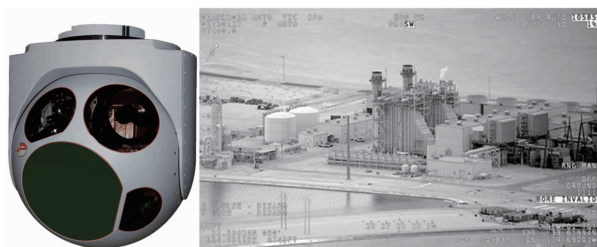


图 1 L-3 WESCAM 公司的 MX-25 光电系统及其短波红外图像

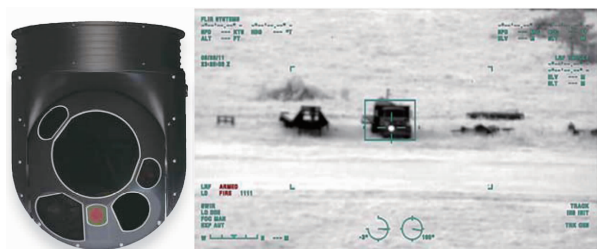


图 2 FLIR 公司的 Star SAFIRE® 380-HLD 光电系统及其激光光斑成像图

本文介绍了短波红外成像的特性及应用在机载光电系统中的重要作用, 并针对像元尺寸为 $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ 的 640×512 元 InGaAs 短波红外探测器, 设计了一种焦距为 500 mm 的小型短波红外光学系统。经零件加工及整机装调后对其进行了 MTF 测试和外景成像测试。结果表明, 该系统成像质量良好, 可用于机载光电系统、伪装识别、安防等领域。

1 设计参数

文中针对当前广泛应用的像元尺寸为 $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ 、响应波段为 $0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$ 的 640×512 元短波红外探测器进行小型长焦光学系统设计(具体参数见表 1)。

表 1 光学系统设计参数

参数	技术指标
探测器像元数	640×512
像元尺寸	15 μm ×15 μm
响应波段	0.9~1.7 μm
F 数	5.0
焦距	500 mm
视场	1.10°×0.88°
像面直径	12.4 mm

2 光学系统结构选型

成像光学系统的结构形式主要分为折射式、反射式、折反式几种, 它们具有不同的像差校正特点。其中, 折射式光学系统的优点是可实现大视场角设计, 适用于系统焦距较短、视场较大的应用领域。折射式光学系统应用于长焦系统时, 由于其二级光谱像差较大, 需要对系统进行复杂化设计来校正二级光谱。因此, 折射式长焦光学系统结构复杂、体积大、重量重, 另外还需要采用 FK61 玻璃、 CaF_2 晶体等具有特殊色散性能的光学元件。然而, 此类光学材料价格高、机械特性较差, 导致长焦系统所需的大口径元件加工难度大、成本高。

反射式光学系统的优点是没有色差, 可实现宽波段成像, 并可达到长焦系统小型化、轻量化设计的目的。然而反射系统视场角较小, 可优化变量少, 很难将其视场做大。因此, 该系统一般适用于大型天文望远镜或星载相机等长焦距、大口径、小视场光学系统。

折反式光学系统的前端采用里奇-克雷蒂安(Ritchey-Chretien, R-C)系统。系统焦距主要由前端反射部分决定, 而反射系统不产生色差; 后端校正组中折射透镜的光焦度小, 折射透镜的二级光谱就很小。因此, 对于折反式系统而言, 全系统的二级光谱不大, 有利于色差以及二级光谱校正。此外, 后端校正组还可以扩大折射式系统的视场。与纯折射式或纯反射式光学系统相比, 折反式系统在实现大口径、小型化设计的同时还可保持相对较大的视场。

因此, 为了简化结构且实现轻量化、小型化, 本文中的光学系统采用折反式一次成像的结构形式。

3 设计结果及像质评价

3.1 设计结果

图 3 和图 4 分别为采用折反式结构形式设计的小型长焦短波红外光学系统的二维光路图和三维光路图。其中, 主镜为抛物面反射镜, 次镜为二次曲面反射镜, 后端透镜均采用球面透镜。主镜口径为 100 mm, 系统遮拦比为 0.25, 光学系统总长度小于 138 mm。

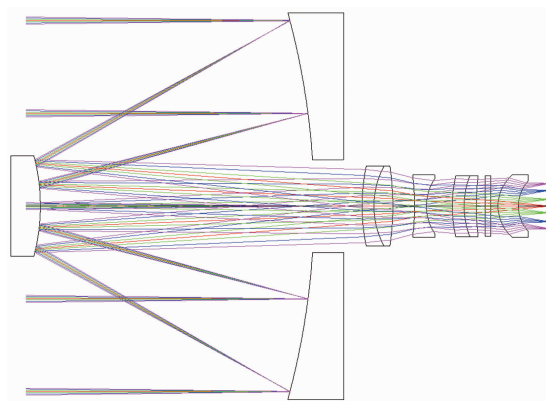


图 3 短波红外光学系统的二维光路图

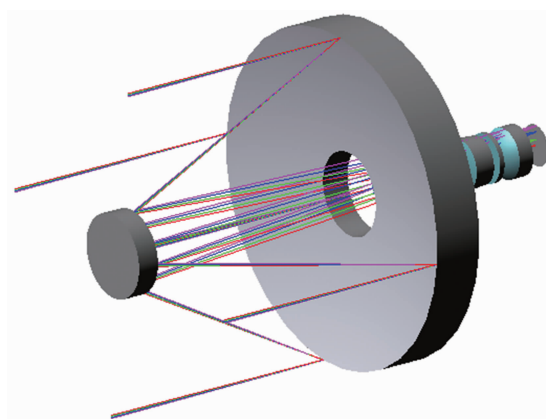


图 4 短波红外光学系统的三维光路图

3.2 成像质量评价

根据奈奎斯特采样定理, 在进行模拟/数字信号转换时, 当系统采样频率为最高采样频率的 2 倍时, 采样之后的数字信号即可完整地保留原始信号中的信息。对于数字化传感器, 探测器能够进行分辨的最高空间频率取决于探

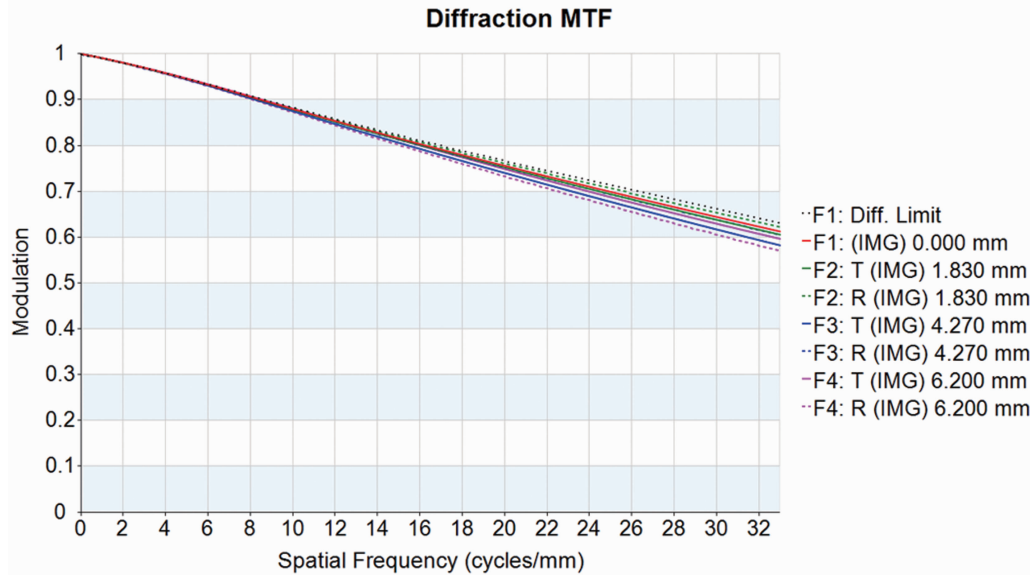


图 5 短波红外光学系统的 MTF 曲线

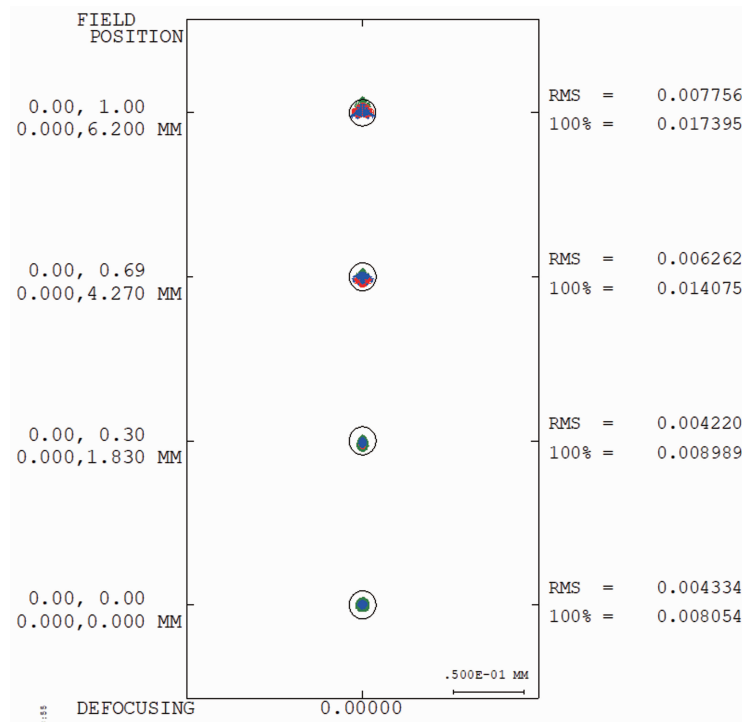


图 6 短波红外光学系统的点列图

测器本身的采样频率，具体关系如下：

$$f_T = \frac{1}{2d} \quad (1)$$

式中， d 为探测器的像元尺寸。

本文采用的探测器像元尺寸为 $15 \mu\text{m}$ ，因此探测器的特征频率为 $f_T = \frac{1}{2d} = \frac{1}{2 \times 0.015} \approx 33 \text{ lp/mm}$ 。

图 5 所示为本文短波红外光学系统的 MTF 曲线。其中，横坐标为像面上的空间频率，纵坐标为光学系统的光学传递函数值。由图 5 可见，在与 640×512 元短波红外探测器对应的特征频率 33 lp/mm 处，本文系统在全视场范围内的 MTF 值均大于 0.55，接近衍射极限，表明该系统成像良好，能够满足应用要求。

点列图是光学系统对点目标成像时所形成的几何像斑, 可为像质评价提供依据。用点列图来评价光学系统的像质是一种方便易行的方法。图 6 为短波红外光学系统的点列图。从设计结果可以看出, 本文系统的弥散斑均方根直径小于探测器的物理直径, 表明该系统成像良好, 能够满足清晰成像的要求。

畸变是主光线的像差。理想光组成像时, 认为其放大率是常数。可是在实际情况中, 视场一般都比较大, 放大率也就不会是常数, 像与物之间就会存在偏差而产生变形。各个视场的光线经过系统成像后, 高斯像面的实际交点 y'_z 与理想像高 y' 之间有一定的差距。这个差距就是畸变, 满足

$$\delta y'_z = y'_z - y' \quad (2)$$

在光学设计中, 通常采用相对畸变 q 来表示:

$$q = \frac{\delta y'_z}{y'} \times 100\% \quad (3)$$

由定义可知, 畸变是垂轴像差, 只对图像

的形状产生影响, 仅与物高 y 有关。畸变主要表现在边缘视场, 中心视场的畸变为 0, 且畸变不影响图像的清晰度。图 7 为本文短波红外光学系统的场曲图与畸变图。可以看出, 该系统的畸变小于 1%, 满足应用要求。

径向能量分布也称环绕能量分布, 提供了基于几何光线追迹像点图的定量光斑尺寸信息。从图 8 中可以看出, 本文系统有 90% 的能量分布在一个像元直径内, 表明该系统能够与探测器良好匹配, 还为加工公差留下一定余量。

4 公差分析

短波红外光学系统的主反射镜、次反射镜以及后端透镜元件在加工过程中均存在误差。因此, 在光学系统设计过程中需要对其进行公差分析, 从而确保设计的系统具有良好的可制造性。表 2 列出了该系统主反射镜、次反射镜的公差类型及公差值。表 3 列出了后端各透镜元件的公差类型及公差值。

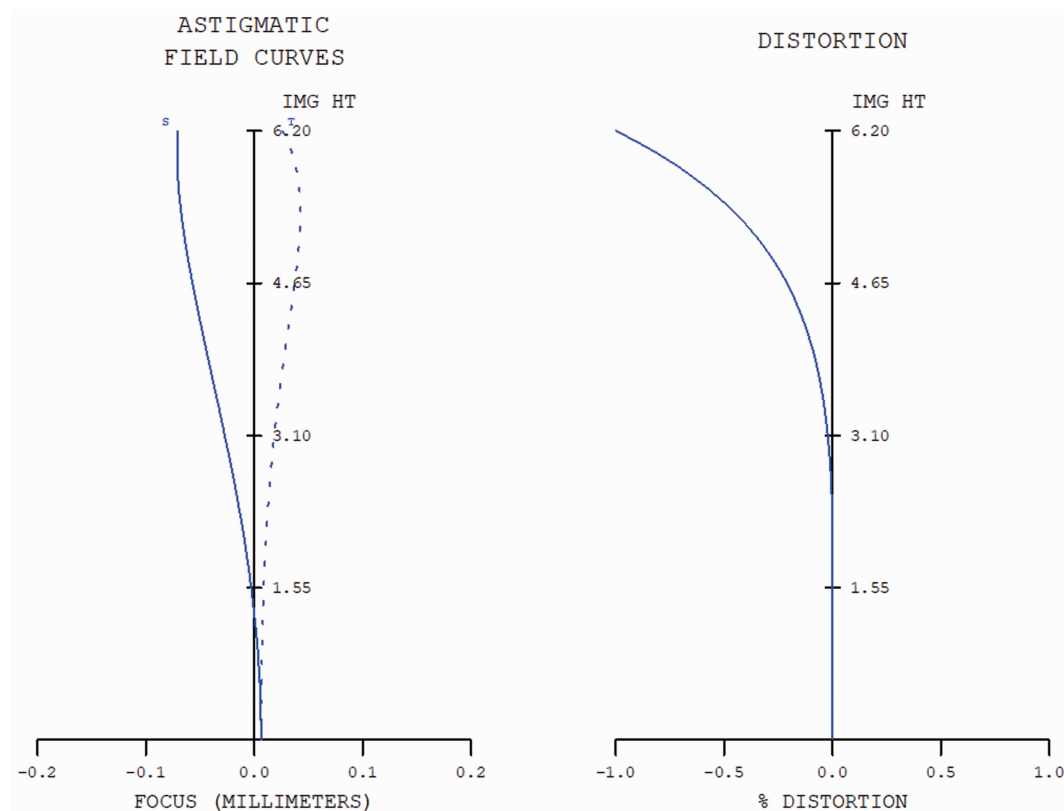


图 7 短波红外光学系统的场曲图与畸变图

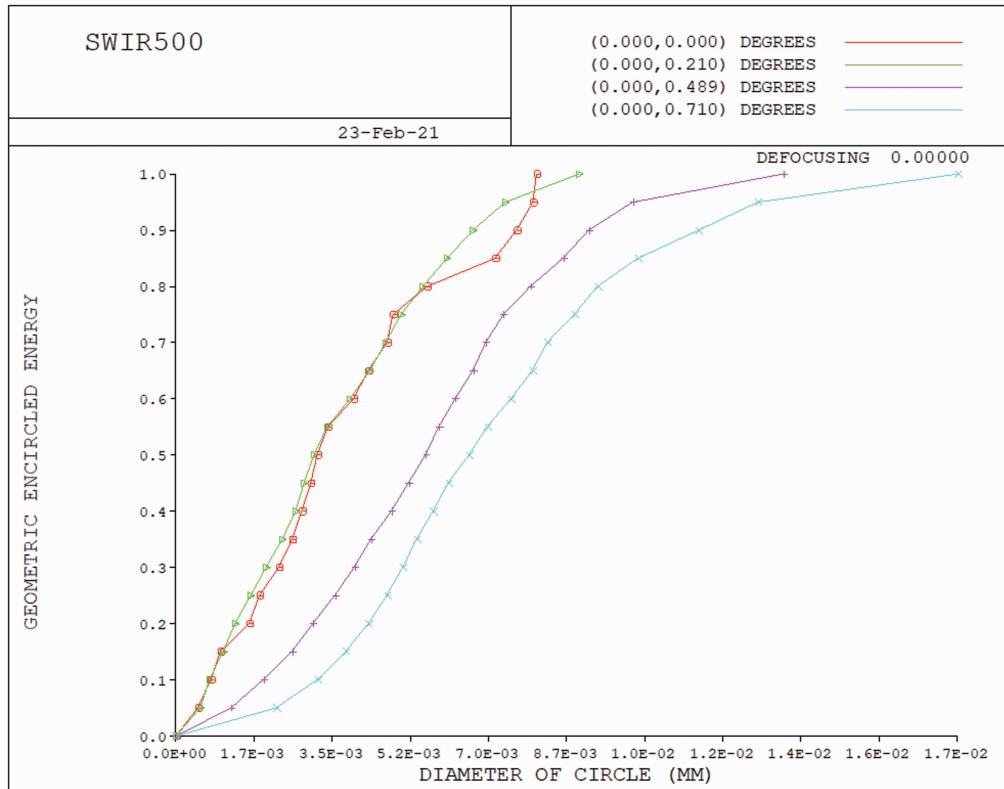


图 8 短波红外光学系统的径向能量图

表 2 前端主反射镜、次反射镜公差分配

公差代号	公差名称	公差值
DLR	曲率半径误差	0.02 mm
DAK	二次曲面系数 K 误差	0.001
RSE	表面 RMS 误差	$1\lambda/30$
DLX	X 方向偏心	± 0.02 mm
DLY	Y 方向偏心	± 0.02 mm
DLZ	Z 方向偏心	± 0.02 mm
DLA	绕 X 轴旋转角	± 0.3 mrad
DLB	绕 Y 轴旋转角	± 0.3 mrad
DLG	绕 Z 轴旋转角	± 0.3 mrad

表 3 后端校正镜组光学透镜公差分配

公差代号	公差名称	公差值
DLF	样板误差	3
DLT	厚度误差	± 0.02 mm
DLX	表面 X 方向偏心	± 0.02 mm
DLY	表面 Y 方向偏心	± 0.02 mm
TRX	表面 X 方向倾斜	± 0.02 mm
TRY	表面 Y 方向倾斜	± 0.02 mm
DSX	元件 X 方向偏心	± 0.02 mm
DSY	元件 Y 方向偏心	± 0.02 mm
BTX	元件 X 方向倾斜	± 0.3 mrad
BTY	元件 Y 方向倾斜	± 0.3 mrad

光学系统在装配完成后需要确定探测器的最佳成像位置。因此,在对短波红外光学系统进行公差分析时,将最后一块透镜至焦平面的距离设置为公差补偿器。

图 9 所示为本文折反式短波红外光学系统的公差曲线。其中,横坐标为光学系统的传递函数,纵坐标为装调后达到该 MTF 值的概率。由图 9 可见,光学系统的零件加工及系统装配均按照表 2、表 3 给定的公差值进行。最终装调后,本文系统的 MTF 值达到 0.4 以上的概率约为 90%,表明装调后光学系统的成像性能满足应用要求。

5 成像效果试验

图 10 和图 11 分别为加工后的主反射镜实物图和次反射镜实物图。整机装配后的 MTF 测试曲线如图 12 所示。可以看出,在短波红外探测器对应的特征频率 33 lp/mm 处,该光学系统中心视场的 MTF 值为 0.43,0.7 视场的 MTF 值为 0.41,边缘视场的 MTF 值为 0.32。外景成像效果如图 13 与图 14 所示。对

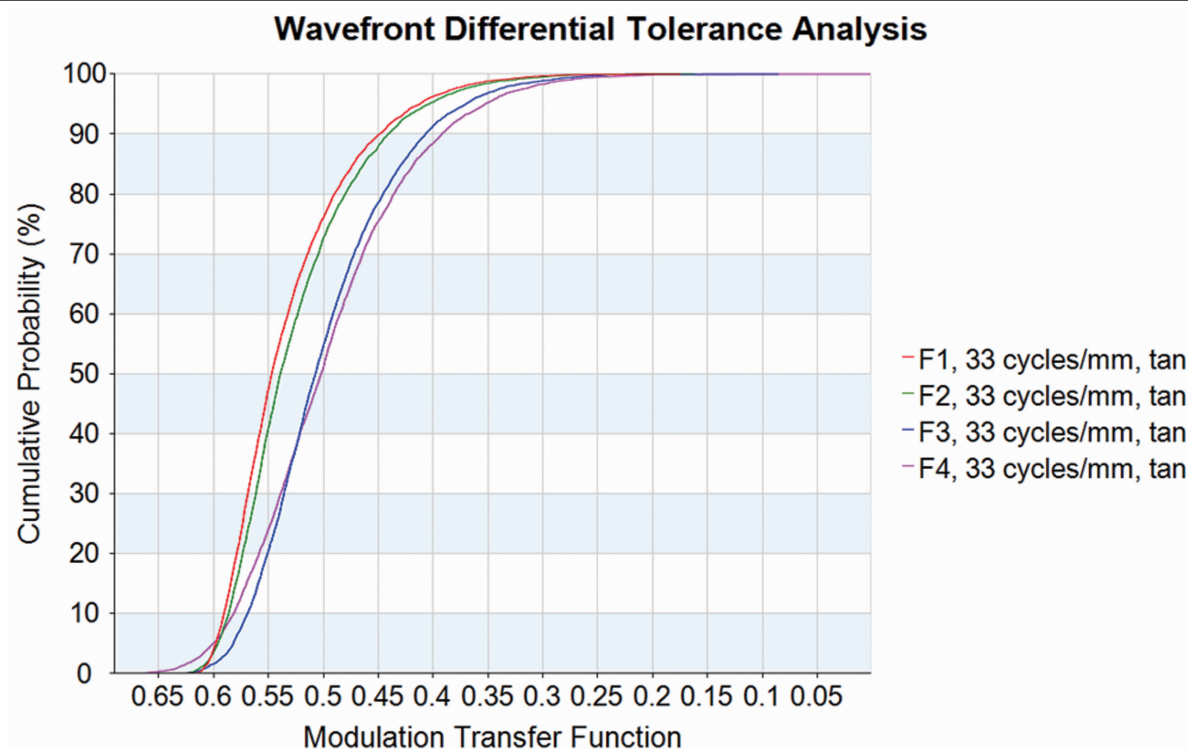


图 9 短波红外光学系统的公差曲线

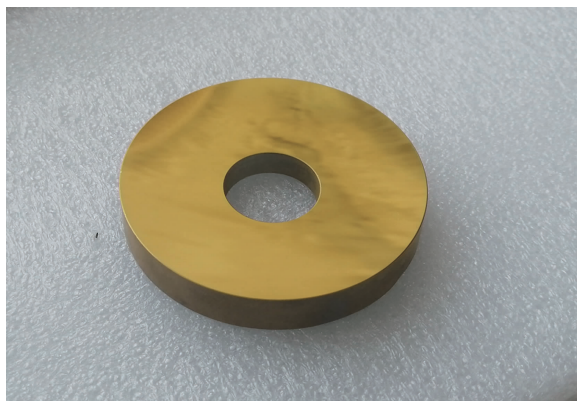


图 10 主反射镜实物图

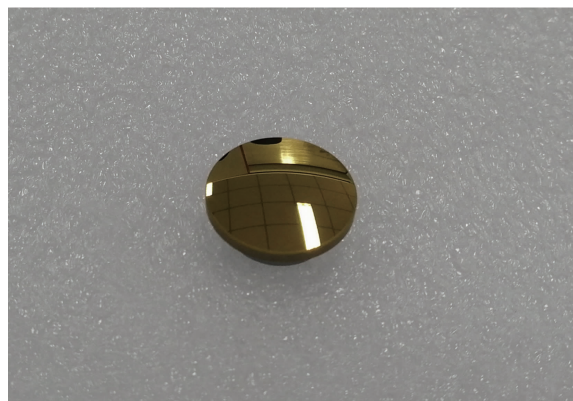


图 11 次反射镜实物图

近距离及远距离目标的成像细节清晰,表明装调后的短波红外成像系统具有良好的成像效果。

6 结束语

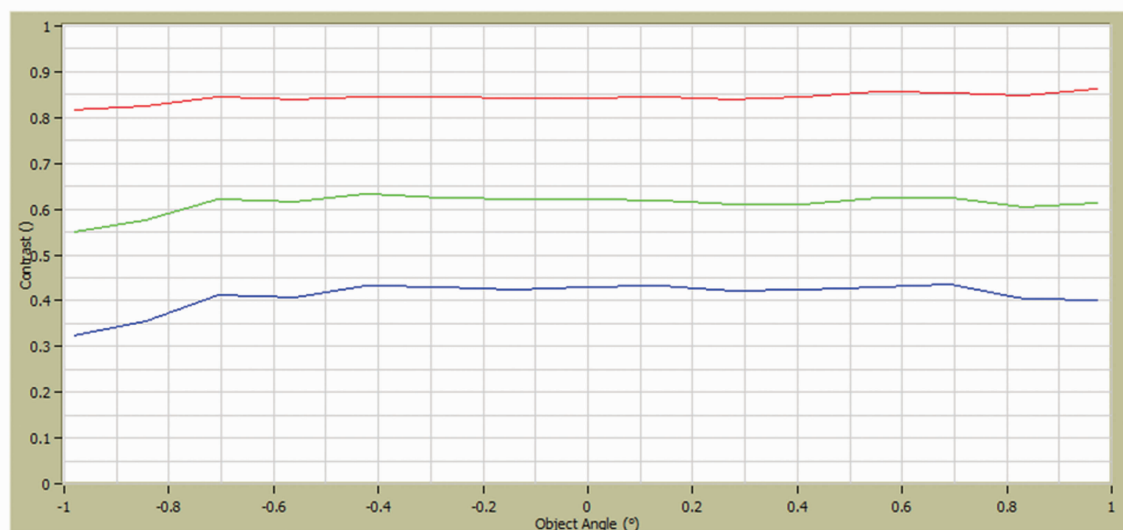
本文开展了折反式短波红外光学系统设计研究。针对目前广泛使用的像元尺寸为 $15\ \mu\text{m} \times 15\ \mu\text{m}$ 的 640×512 元短波红外探测器,设计了一种焦距为 500 mm 的折反式小型化短波红外长焦光学系统。该系统主镜口径为 100 mm,系统遮拦比为 0.25,光学系统总长度小于 138 mm,具有体积小、重量轻的特点。这种系统

在目标探测与识别、机载光电侦察等领域具有广泛的应用前景。下一步的研究重点为双视场折反式大口径、长焦距光学系统设计。

参考文献

- [1] 陆红强, 张璟玥, 张宝泉. 短波红外成像系统对激光光斑探测能力分析 [J]. 应用光学, 2018, 39(4): 574-578.
- [2] 纪明, 许培忠, 徐飞飞. 武装直升机光电系统发展与对策 [J]. 应用光学, 2010, 31(1): 1-7.
- [3] 蔡毅, 胡旭. 短波红外成像技术及其军事应用 [J]. 红外与激光工程, 2006, 35(6): 643-647.

Measurement Graph: MTF vs. Object Angle



Measurement Table: MTF vs. Object Angle

	Object Angle (°)															Legend
MTF	0.97900	0.84200	0.70400	0.55900	0.42300	0.28300	0.14100	0.00300	0.14000	0.27700	0.41500	0.55900	0.69500	0.83200	0.97700	
Sag 11(lp/mm)	0.815	0.824	0.844	0.839	0.844	0.844	0.840	0.842	0.845	0.839	0.844	0.855	0.853	0.845	0.861	
Sag 22(lp/mm)	0.550	0.573	0.621	0.614	0.631	0.624	0.621	0.619	0.617	0.610	0.609	0.622	0.622	0.602	0.612	
Sag 33(lp/mm)	0.322	0.355	0.412	0.407	0.432	0.429	0.424	0.429	0.432	0.420	0.422	0.428	0.435	0.402	0.400	

图 12 装配后的 MTF 测试曲线



图 13 近距离外景成像效果(1 km)



图 14 远距离外景成像效果(5 km)

- [4] 向梦, 邵文斌, 史衍丽. InP/InGaAs 探测器对伪装目标成像研究 [J]. 红外技术, 2017, 39(10): 873-879.
- [5] 周岩, 吴时彬, 汪利华, 等. 大口径折反式中波红外衍射望远镜系统设计 [J]. 应用光学, 2021, 42(5): 767-770.
- [6] L-3 WESCAM. Ultra Long-Range Multi-Sensor,

Multi-Spectral Imaging Systems [EB/OL]. www.militarysystems-tech.com/suppliers/multi-sensor-and-multi-spectral-imaging-and-targeting-systems/l3-wescam, 2023.

- [7] FLIR. Star-SAFIRE-380-HLD-Datasheet [EB/OL]. <https://infrared.ro/docs/Star-SAFIRE-380-HLD-Datasheet-US.pdf>, 2020.