

文章编号:1001-5078(2024)10-1507-11

· 综述与评论 ·

## 多波段共孔径共焦面光学系统综述

尤宏波<sup>1</sup>, 赵超<sup>2</sup>, 李江勇<sup>1</sup>, 杨加强<sup>1</sup>

(1. 华北光电技术研究所, 北京 10015; 2. 空军装备部驻北京军事代表局驻天津地区第二军事代表室, 天津 300000)

**摘要:**多波段共孔径共焦面光学系统由于具备“一个光学镜头与一个探测器”的性能等效于传统光学系统(两个光学镜头搭配两个探测器)的能力,共口径共焦面成像能够实现视场与目标信息的匹配,为后续各波段信息融合提供前提条件。基于其光学元件数量少、体积小等特点,已经成为多波段光学系统新的研究方向。特别是环形反射式光学系统,凭借其体积小等优势,在枪瞄准镜、导引头、机器视觉等领域占据着重要的位置。本文以多波段共孔径共焦面光学系统发展为主线,分析了多波段共孔径共焦面光学系统的研究现状,全面介绍了多种类型的多波段共孔径共焦面光学系统,讨论了其光学结构特点、光学系统性能,并比较了这几种光学系统的优缺点,供光学设计领域研究人员共同研讨。

**关键词:**光学系统;多波段;共孔径;共焦面;折反式光学系统;环形反射式;三镜反射

**中图分类号:**O43;TN202 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2024.10.002

## Overview of multi-band common aperture confocal plane optical system

YOU Hong-bo<sup>1</sup>, ZHAO Chao<sup>2</sup>, LI Jiang-yong<sup>1</sup>, YANG Jia-qiang<sup>1</sup>

(1. North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China; 2. The Second Military Representative Office of the Beijing Regional Military Representative Bureau of the Air Force Armaments Department in Tianjin, Tianjin 300000, China)

**Abstract:** Multi-band common aperture confocal surface optical system as a result of ‘an optical lens and a detector’ performance is equivalent to the ability of the traditional optical system (two optical lenses with two detectors). Co-calibre confocal plane imaging enables the matching of the field of view with the target information and provides a prerequisite for the subsequent fusion of information in all bands. Based on its small number of optical components and small size, this system has become a new research direction of multi-band optical system. In particular, the annular multi-reflection optical systems, with their small size, occupy an important position in the fields of gun sights, guide heads, and machine vision. Taking the development of multi-band common aperture confocal surface optical system as the main line, the research status of multi-band optical system is analyzed, and various types of multi-band common aperture confocal surface optical system are comprehensively introduced. The characteristics of the optical structure, optical system performance, and the advantages and disadvantages of these optical systems are discussed and compared, which provide a reference for researchers in the field of optical design.

**Keywords:** optical system; multi-band; common aperture; confocal plane; refraction-reflection optical system; annular multi-reflection; three-mirror reflection

## 1 引言

随着光学技术的发展,各式光学系统已经在枪瞄准镜、导引头、机器视觉等方面得到了广泛的应用,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。多波段共孔径共焦面光学系统已有 100 多年的发展历史,具有信息特征多、系统体积小、环境适应好、焦面同一等特点,能够实现视场与目标信息的匹配,为后续各波段信息融合提供前提条件。在现代光学仪器上有着越来越广泛的应用。多波段共孔径共焦面结构形式简洁,光学结构形式多样,发展延续性强,具有很强的理论研究意义。

缩小体积、降低重量是未来产品的一个重要的发展方向<sup>[1]</sup>,从 20 世纪到 21 世纪,多波段共孔径共焦面光学系统经历了以透射式光学结构、折反式光学结构和反射式光路结构三大阶段。透射式结构的缺点是尺寸大,重量大,成本高,尤其在一些体积受限、重量受限、成本受限的领域不能使用<sup>[2]</sup>。2007 年, Daniel L. Marks 提出一种折反式结构<sup>[3]</sup>,选择合适的透镜材料和镀膜材料,在保证成像质量的同时,大大缩小了光学系统的体积和重量。同年,ERIC 在论文中证明多次反射的光学结构通光量高,具有更高分辨率<sup>[4]</sup>,可以实现微型多波段光学系统。在而后至今的 10 多年里,各种结构的多波段共孔径共焦面光学系统不断被研究者提出,也衍生出多种结构,多波段共孔径共焦面光学成为当下热门的研究方向。

多波段共孔径共焦面光学系统是实现光电探测设备小型化、轻量化的最佳途径<sup>[5]</sup>,本文分析了多波段共孔径共焦面透射式光学系统、多波段共孔径共焦面折反式光学系统、多波段共孔径共焦面环形反射式光学系统、多波段共孔径共焦面多镜反射式光学系统四种不同结构,就经典模型进行了相关介绍,对现下时兴的多波段共孔径共焦面光学系统进行了详细梳理,并对其未来方向进行了展望。

## 2 国内外多波段共孔径共焦面光学系统典型结构

多波段共孔径共焦面红外光学系统成像在同一焦面上,可以满足小体积应用场景和相对复杂的工作环境<sup>[6]</sup>。从上世纪起,多波段共孔径共焦面光学系统就已经成为了国内外的研究热点,经历了将近 70 年的发展,也取得了显著的研究成果。对比透射式结构、折反式结构、反射式结构,环形反射式结构的体积

更小、适用范围更广泛,与系统集成的发展相辅相成,可以满足目标多波段信息探测的发展趋势,逐渐成为主要研究方向。在分析过光学系统的优缺点后,文章对这四种系统的光学结构进行逐一介绍。

### 2.1 透射式多波段共孔径共焦面光学系统

多波段共孔径共焦面透射式结构是多波段光学系统中非常经典的一种光学结构,这种光学结构不会受到遮拦的影响,视场大、波段宽、成像质量好<sup>[7]</sup>。但是使用的光学元件较多,系统体积大,重量沉,应用场景受限,多应用于安防监控、热像仪、瞄准吊舱等领域。

2023 年,栗洋洋等人设计了一种  $3.5 \sim 4.9 \mu\text{m}$  与  $7.5 \sim 9.5 \mu\text{m}$  制冷型红外双波段广角光学系统,通过消色差理论分析了透镜材料的阿贝数、折射率对于玻璃色散的影响,进行选材与优化设计,光学系统 F#1.6,焦距 10 mm,FOV  $\approx \pm(75^\circ \times 75^\circ)$ 。光路如图 1 所示<sup>[8]</sup>。

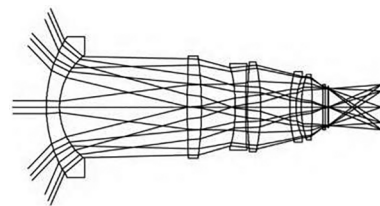


图 1 光学系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of optical system

2016 年,西光所的曲锐等人发明了一种短波、长波红外双波段共焦面大相对孔径光学系统,针对实现  $0.9 \sim 1.7 \mu\text{m}$  与  $8 \sim 12 \mu\text{m}$  双波段成像,采用摄远式结构,光学系统 F#1,最大相对孔径为 56 mm,焦距 50 mm,采用对角线尺寸为 16mm 的探测器,并利用线膨胀系数较大的铝合金材料与组成的各个镜片配合进行光学被动消热差<sup>[9]</sup>。光路如图 2 所示。

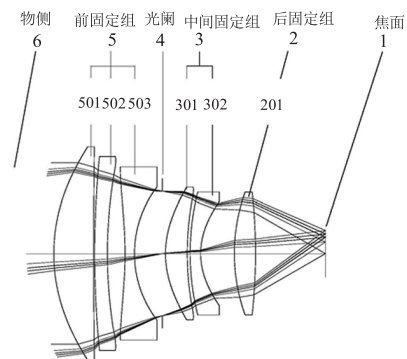


图 2 红外双波段共焦面大相对孔径光学系统光路

Fig. 2 Infrared dual band common focal large aperture optical system

2022年,邓键等人用微分原理扩展复消色差理论,比较波段间和波段内的折射率、色差系数、热差系数,选择光学元件的材料<sup>[10]</sup>。光学系统F#2,使用2.7~3.3 μm、3.7~4.8 μm、7.7~9.5 μm,焦距82 mm,采用像元尺寸为30的探测器,FOV ≈ ±(2.6° × 2.6°)。光路及其MTF曲线如图3所示。

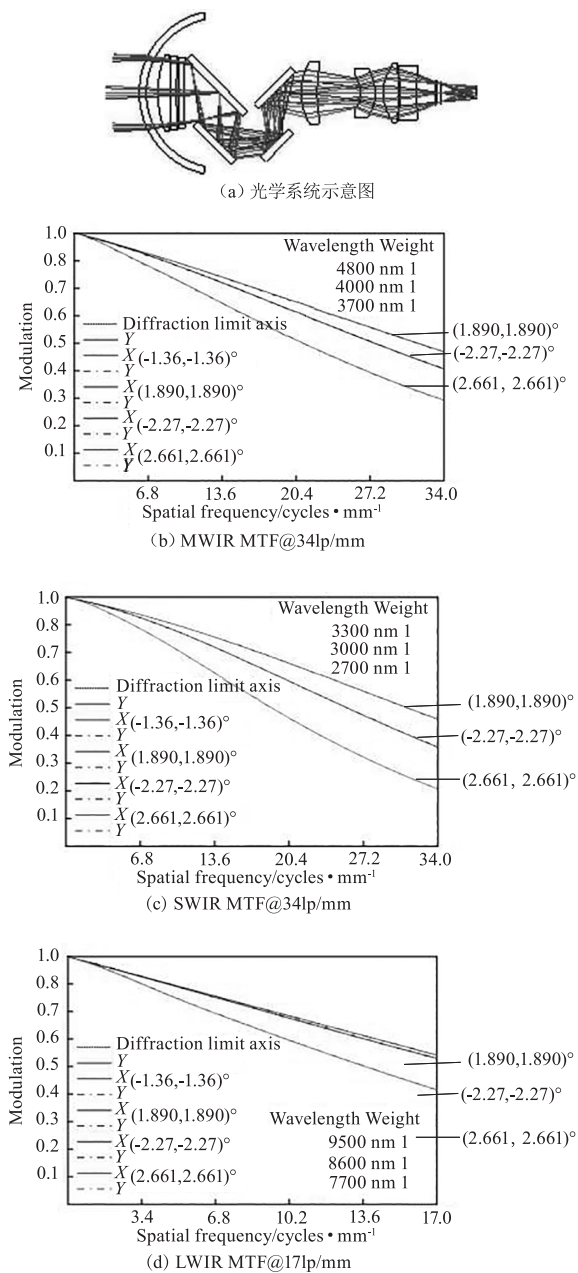


图3 一种三波段共光路系统及其MTF曲线

Fig. 3 A tri-band co-path system and its MTF curves

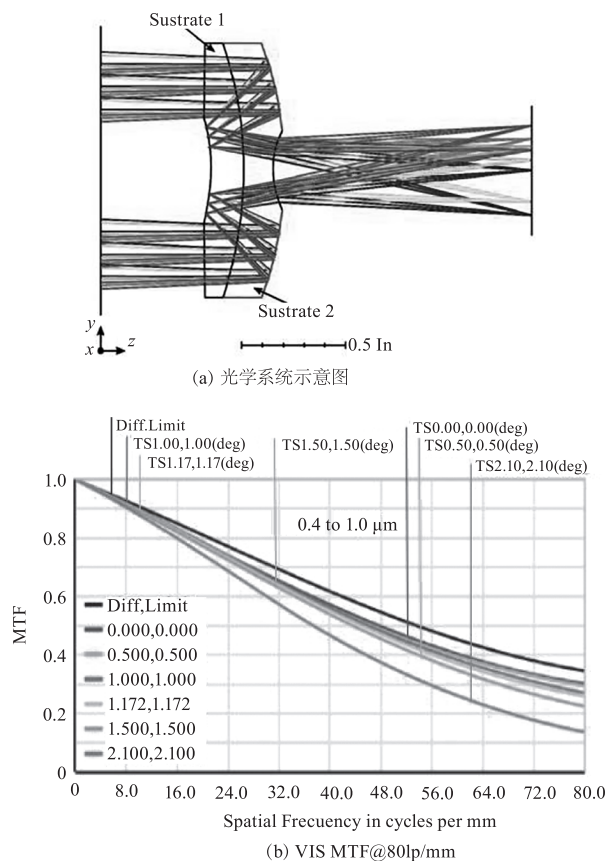
透射式共焦面光学系统对材料在不同波段间的色散特性、折射率引入微分思考,应用消色差原理,平衡波段内、波段间的色差。随着光学材料的发展,

透射式多波段光学系统逐渐采用硫系材料拓宽波段,提高宽光谱共焦能力。但这种结构使用的光学镜片多、系统体积大,不适用于复杂环境的军事场景中。对比反射式结构,不受制于遮拦的影响,视场角较大,产品价格低,因此民用多波段产品多使用这种光学结构。

2.2 折反射式多波段共孔径共光路光学系统

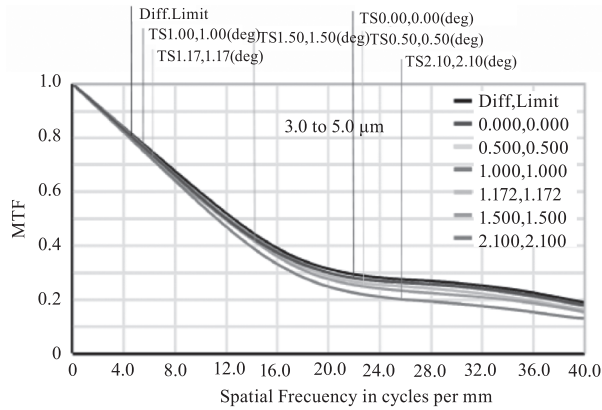
从20世纪中期开始,美、英、法、德等发达国家的军事航空部门就开始重视发展各种多波段共孔径共光路识别瞄准系统<sup>[11]</sup>,为了缩短光路、满足小体积的设计需求,光学系统的结构也逐渐从透射式向反射式转变。

2019年,罗切斯特大学的M. GALAN基于R-C望远镜设计了一种紧凑、消色差、高性能的光学系统(SoCatS)<sup>[12]</sup>。光学系统F#4.3,使用0.4~1 μm、3~5 μm、8~12 μm,FOV ≈ ±(4.2° × 4.2°),反射面使用氟化钙拟合在同一基底材料。使用R-C结构造成的中心遮拦限制了光学系统的视场,但是小体积和轻量级使它在商业、空间和军事应用方面具有高度的优势。光路及MTF曲线如图4所示。

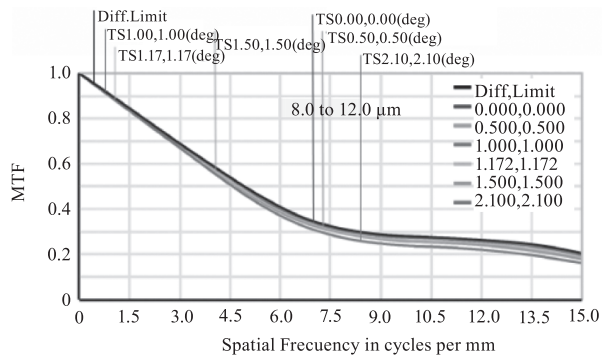


(a) 光学系统示意图

(b) VIS MTF@80lp/mm



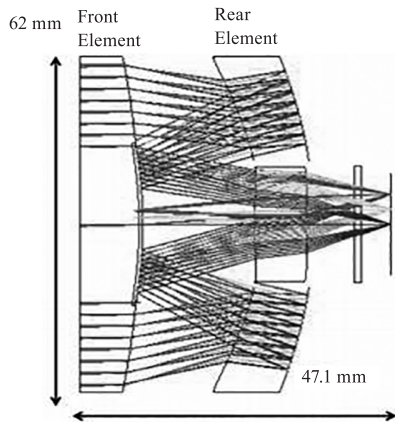
(c) MWIR MTF@40lp/mm



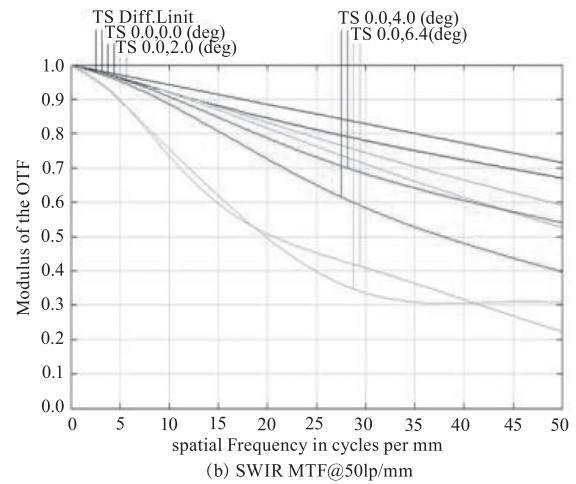
(d) LWIR MTF@15lp/mm

图 4 一种紧凑、消色差、高性能的光学系统及其 MTF 曲线  
Fig. 4 A compact, achromatic, high-performance optical system and its MTF curves

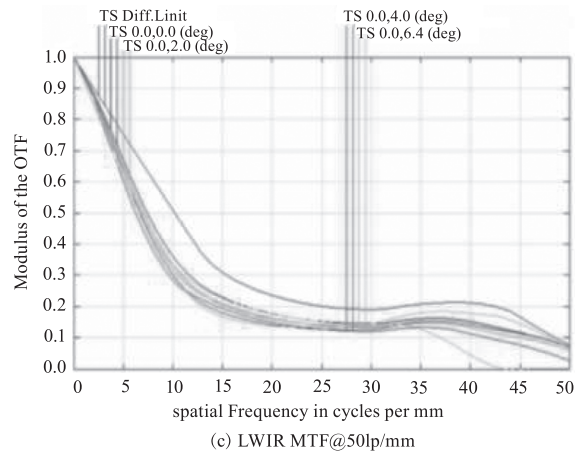
2013 年, 杜克大学的 Daniel L. Marks 提出了一种近红外、短波、长波红外三波段宽视场折反射式大视场紧凑型望远镜, 此系统采用了卡塞格林光学结构, 光线进行了两次反射, 成像于一个望远镜头。光学系统 F#1.2, 焦距 114 mm, 该系统采用像元尺寸为  $10\ \mu\text{m}$ , 像元数为  $1024 \times 1024$  的探测器,  $\text{FOV} \approx \pm(10^\circ \times 10^\circ)$ 。该系统体积较小, 满足轻量化的概念。光路及 MTF 曲线如图 5 所示。



(a) 光学系统示意图



(b) SWIR MTF@50lp/mm

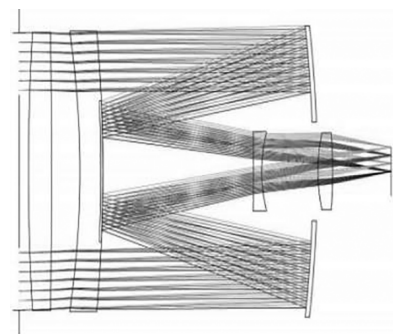


(c) LWIR MTF@50lp/mm

图 5 宽视场紧凑型望远镜及其 MTF 曲线

Fig. 5 Wide field compact telescope and its MTF curves

2019 年, 韩国的 M. TUMARINA 等人设计了一种宽视场、紧凑型、高分辨率望远镜, 光学系统光学系统 F#3, 焦距 745 mm, 采用探测器尺寸为  $3.1\ \mu\text{m}$ 、探测器尺寸为  $3.5\ \mu\text{m}$ ,  $\text{FOV} \approx \pm(2.9^\circ \times 2.9^\circ)$ <sup>[13]</sup>。该光学系统采用了一种新的装配方式, 采用了特殊的粘合剂, 像质好, 体积小, 解决了传统卫星体积过大、价格昂贵的问题。光路及其 MTF 曲线如图 7 所示。



(a) 光学系统示意图

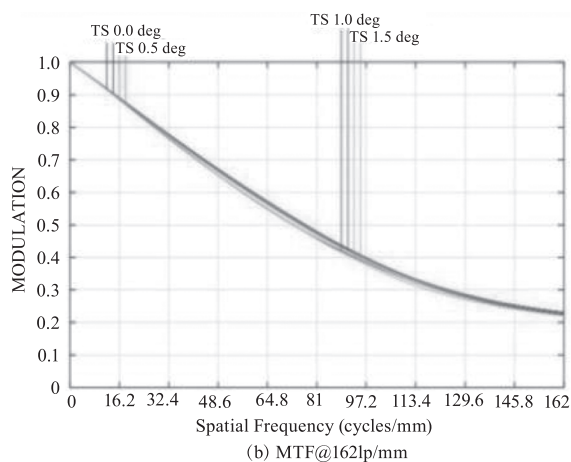


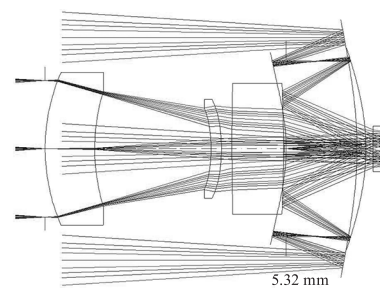
图6 一种宽视场、紧凑型、高分辨率望远镜及其 MTF 曲线  
Fig.6 A wide field of view, compact, high-resolution telescope and its MTF curves

笔者通过对比 500 ~ 750 nm 和 8 ~ 12  $\mu\text{m}$  波段的材料温度特性,根据复消色差理论和光学被动消热差理论,选择了三种材料和四面非球面矫正像差。设计了一款可见/长波红外光学系统。光学系统 F#1.1, 焦距为 28 mm, 采用像元尺寸为 12  $\mu\text{m}$ /24  $\mu\text{m}$  的双色探测器, FOV  $\approx \pm(7.2^\circ \times 7.2^\circ)$ , 总长  $\leq 30$  mm, 畸变  $< 5\%$ , MTF 接近衍射极限。长波红外/可见光成像在同一焦面上, 缩小了系统体积<sup>[14]</sup>。光路及其 MTF 曲线如图 7 所示。

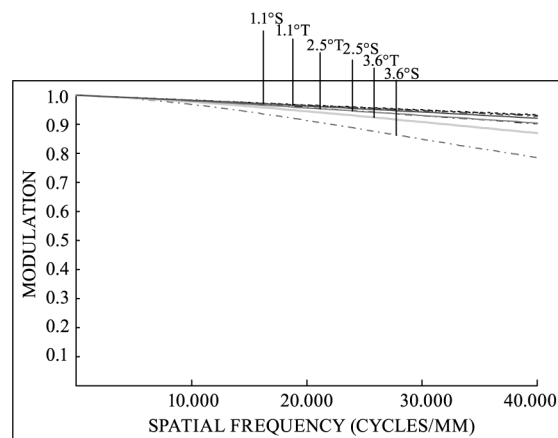
多波段折反式系统设计基于消色差理论与光学被动消热差理论,是卡塞格林、R-C 结构的设计引申。由于光学材料的发展,衍射元件、非球面、硫系玻璃逐渐加入到设计中,像差、色差、热差得到更好的校正。这种结构形式已逐渐占据市场,由于次镜带来遮拦比使得视场受到了限制,多数产品全视场为  $3^\circ \sim 5^\circ$ , 但光学系统的性能指标得到大大提升,体积减小。由于价格适中,结构紧凑,目前这种系统在军品、民品市场中广受欢迎,多应用于导引头、机器视觉等应用场景。

### 2.3 多镜反射式多波段光学系统

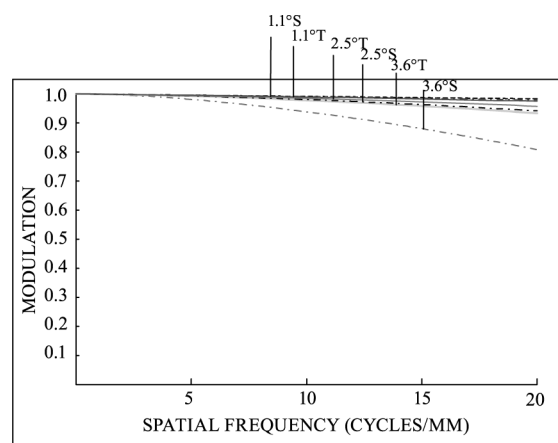
多镜反射式结构得益于计算机性能、光学制造能力与光学测试能力的提升,由于同时具备校正球差、慧差与像散三种像差的能力,可以实现较高的光学性能。基于其反射镜数量少等特点,在光学成像领域有着广泛的应用。特别是离轴三镜反射式光学系统,凭借着其无孔径遮拦、视场相对较大等优势,在高性能光学仪器装备中占据着重要的作用<sup>[15]</sup>。



(a) 光学系统示意图



(b) VIS MTF@40lp/mm



(c) LWIR MTF@21lp/mm

图7 小型共孔径共光路共焦面光学系统及其 MTF 曲线

Fig.7 Small size common aperture common path confocal plane optical system and its MTF curves

反射式光学系统的主要特点是无色差和冷反射<sup>[16]</sup>,基于同轴四反结构设计了一款“反射透镜”结构,光线在主镜 1 反射到次镜 2,在中央通孔附近有一中间像;再到三镜 3 反射到四镜 4,最后汇聚到焦面 5。光学系统 F#1.5, 焦距为 300 mm, FOV  $\approx \pm(3^\circ \times 3^\circ)$ , MTF 接近衍射极限。此光学系统实现了小体积、轻量化。但是遮拦较大,系统会产生像差。光路如图 8 所示。

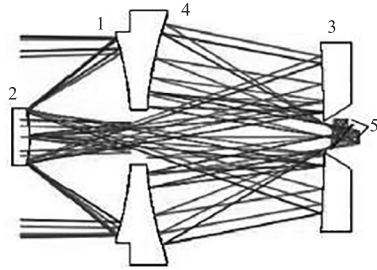


图 8 反射透镜结构

Fig. 8 Reflective lens structure

2021 年,李杰等人设计了一种红外双波段成像的光学系统<sup>[17]</sup>,光路如下图所示。通过对比 3 ~ 5  $\mu\text{m}$  和 8 ~ 12  $\mu\text{m}$  波段的折谐衍射透镜材料的热膨胀系数、导热率、努式硬度、断裂强度,选择 Ge 作为反射镜基底材料,将衍射面设置于系统的最后一面,并使用宏语言进行优化。光学系统有效口径 300 mm,焦距 1200 mm,FOV  $\approx \pm (4^\circ \times 4^\circ)$ ,总长  $\leq 750$  mm,双波段 RMS  $\leq 25$   $\mu\text{m}$ ,MTF  $\geq 0.4$ 。光路及其 MTF 曲线如图 9 所示。

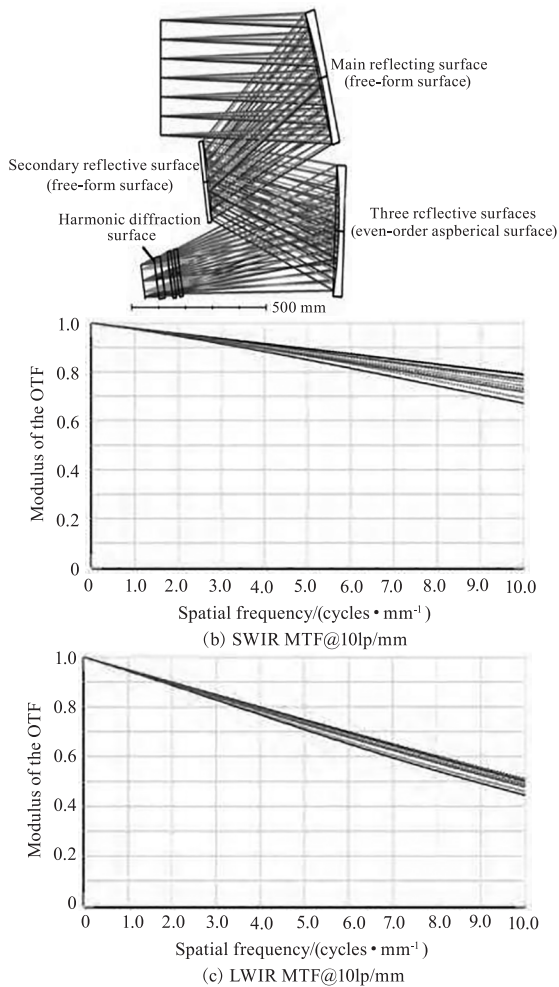
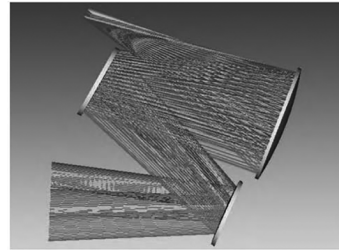


图 9 机载红外双波段成像光学系统及其 MTF 曲线  
Fig. 9 Airborne infrared dual-band imaging optical system and its MTF curves

随着红外技术的发展,为了将光学系统的体积进一步减小,离轴反射式系统逐渐推广应用。闫茹梦等人设计了一种离轴三反系统<sup>[18]</sup>,光学系统焦距为 50 mm,成像波段为 1 ~ 1.7  $\mu\text{m}$ ,3.4 ~ 4.8  $\mu\text{m}$  和 7.5 ~ 14  $\mu\text{m}$ ,FOV  $\approx \pm (12^\circ \times 10^\circ)$ ,MTF 接近衍射极限。光路及其 MTF 曲线如图 10 所示。



(a) 光学系统示意图

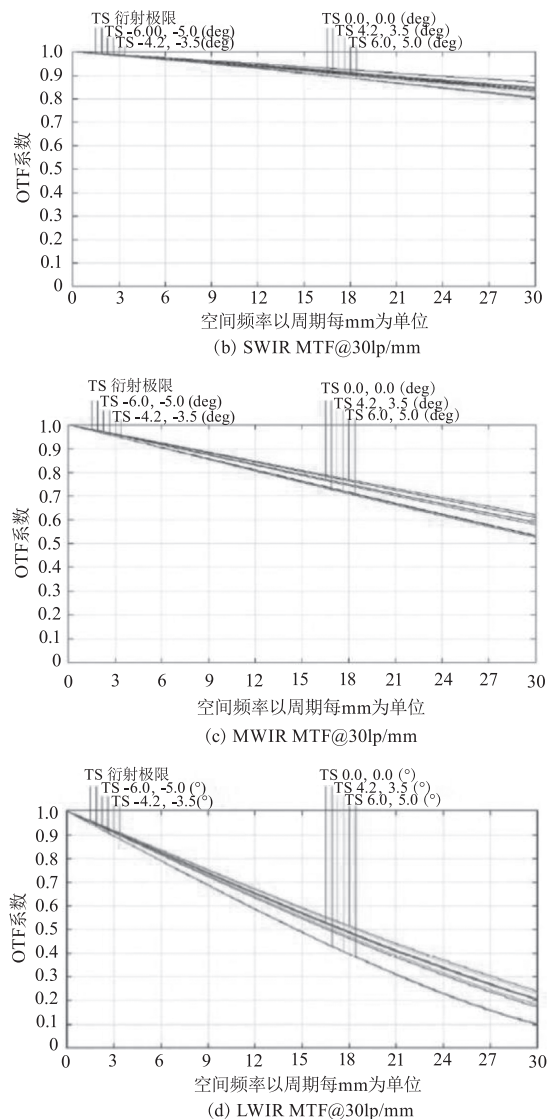


图 10 自由曲面离轴三反系统及其 MTF 曲线  
Fig. 10 Freeform surface off-axis triple reflection system and its MTF curve

2022 年,曹一青等人基于同轴四反光学系统像

差表达式,利用 matlab 开发的自适应变异概率遗传算法求解初始结构,设计了一种离轴四反系统,相比于三反系统具有更多设计自由度,透镜选用高阶偶次非球面,像差平衡和校正能力强<sup>[19]</sup>。其光路及 MTF 曲线如图 11 所示。

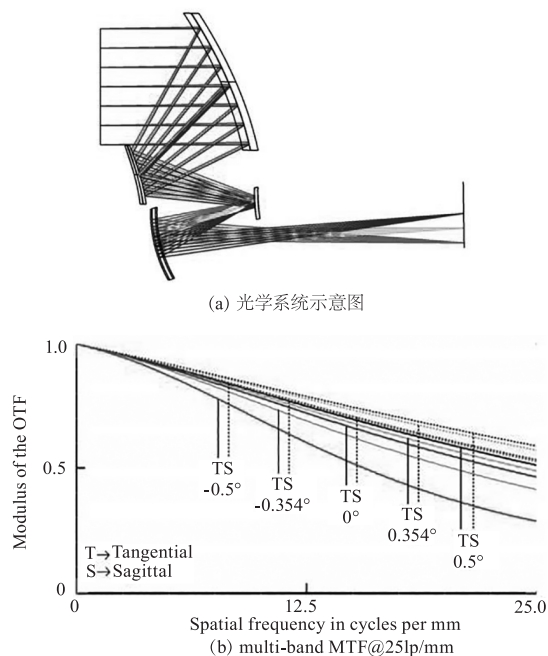


图 11 离轴四反光学系统及其 MTF

Fig. 11 Off-axis four mirror optical system and its MTF curve

为了进一步提升离轴反射式光学系统的成像质量。2023 年 7 月,法国的 Louis Duveau 等人设计出了多波段自由曲面离轴三反系统<sup>[20]</sup>。光学表面采用的自由曲面进行光学设计,对像质有着显著的改进。光学系统  $F\#1.5$ , 焦距为 18 mm,  $FOV \approx \pm(24^\circ \times 18^\circ)$ , 畸变  $< 6\%$ 。自由曲面提供足够的自由度,在提升光学性能的同时,减小了系统的体积和重量,且在实际应用中成像质量优良。光路如图 12 所示。

多镜反射式结构的体积对比折反射式结构体积较小,可以适用于环境复杂的军事应用中。随着光学加工技术越发精进,自由曲面代替非球面加入到设计中,它可以做到非对称、不规则、复杂的自由曲面随意组合而成,使系统达到更优的性能。同轴反射式光学系统存在孔径遮拦,对光学系统集光能力和衍射分辨率均造成影响,尤其在视场角较大时这一现象更加明显。离轴反射式光学系统由于不存在孔径遮拦,相同光学口径下具有更强的光能利用率,也更容易获得较高的成像质量。但离轴三反光学系统装调难度较高,国内对于此课题的研究经验不够

丰富;且自由曲面加工拥有极高的精度,元件加工价格相对折反射式光学系统高出几倍,暂未大批量加工与应用。这种结构仅适用于拥有高精尖需求的军用市场,不适用于对于价格敏感的民用市场。

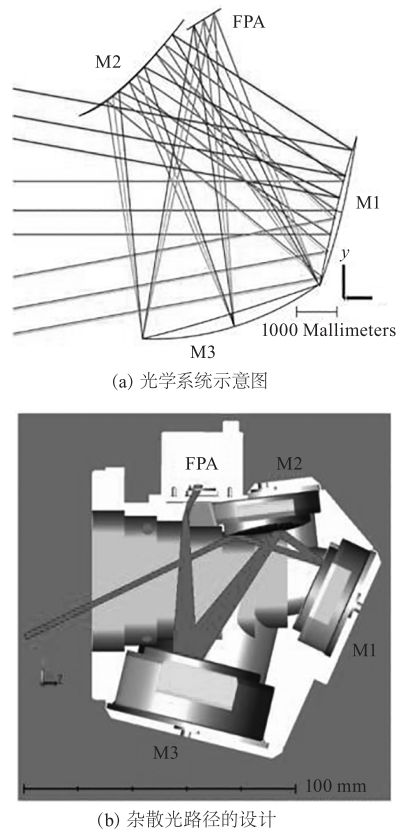


图 12 多波段自由曲面离轴三反系统光路及杂散光路径的设计

Fig. 12 Optical path of multi band free freeform surface off-axis triple reflection system and straylight path of the design

#### 2.4 环形反射式多波段共孔径共焦面光学系统

在研究多镜反射的基础上,为了实现多波段共孔径共焦面光学系统的小型化,人们进一步提出了环形反射式光学系统。虽然此类结构存在中心遮拦,光学系统的视场会受到结构自身的限制,难以实现大视场设计。但是环形反射式结构大大减小了系统的体积,此类结构的体积和重量可以做到极致的小,同时装调复杂度可接受,适用于枪瞄准镜等小体积需求的应用场景。随着探测器从单波段到多波段使用的更新迭代,环形反射式光学系统进入了反射式结构的黄金时代。

2020 年,朴明旭等人设计了一种小型化双波段成像系统,采用环形反射式结构,并使用了多个衍射光学元件,构建了四反射红外/激光双波段 CFIL 的初始结构,尽可能压缩体积<sup>[21]</sup>。光学系统  $F\#1.2$ , 焦距 41.7 mm, 使用波段  $0.45 \sim 1.1 \mu\text{m}$ , 采用探测

器像元尺寸为  $3\ \mu\text{m}$ 、像元数为  $1920 \times 1080$  的探测器,  $\text{FOV} \approx \pm(7.6^\circ \times 7.6^\circ)$ 。光路和 MTF 曲线如图 13 所示。

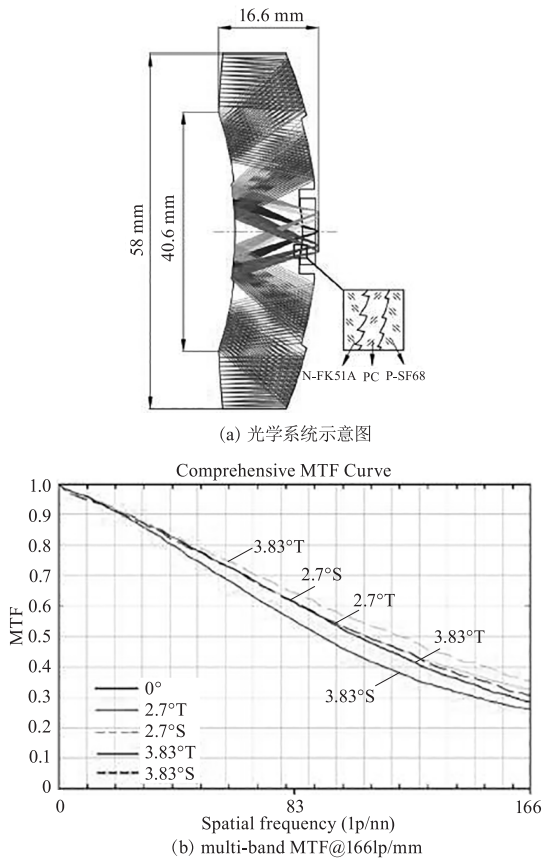
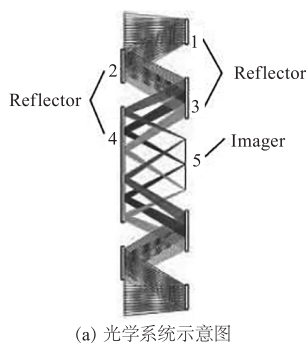


图 13 小型化双波段成像系统及其 MTF 曲线  
Fig. 13 Miniaturized dual-band imaging system and its MTF curves

2021 年, 长春理工大学的王琦等人针对  $3 \sim 5\ \mu\text{m}$ 、 $8 \sim 10\ \mu\text{m}$  波段设计了一种共焦面环形孔径超薄成像光学系统, 采用反射式结构, 实现了低成本、小型化红外双波段光学系统, 光学系统 F#1, 系统轴向长度为  $24\ \text{mm}$ , 焦距为  $50\ \text{mm}$ ,  $\text{FOV} \approx \pm(14^\circ \times 14^\circ)$  [22]。此光学系统多个环形反射面位于同一基地材料上, 在保证成像质量的基础上, 实现了轻量化光学系统。光路和 MTF 曲线如图 14 所示。



(a) 光学系统示意图

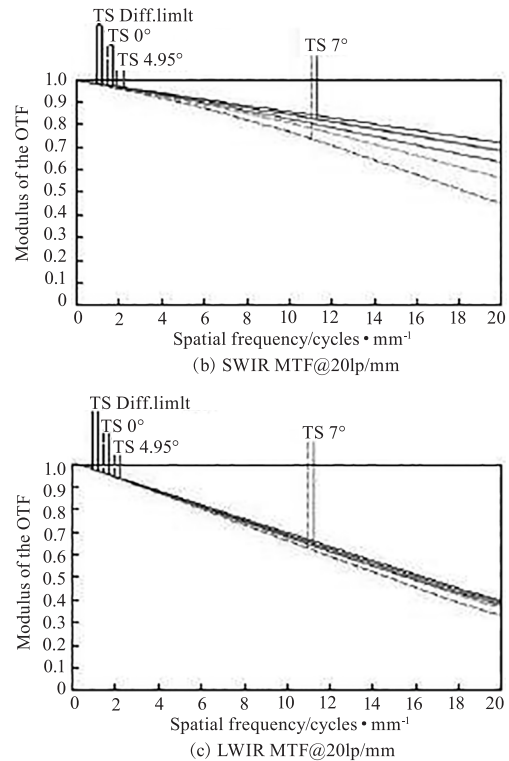


图 14 一种共光路共焦面环形孔径超薄成像光学系统及其 MTF 曲线

Fig. 14 A common path confocal plane circular aperture ultrathin optical system and its MTF curves

2022 年, 罗彻斯特大学的 David 在 SoCatS 结构的基础上设计了一种大孔径、高分辨率的环形折叠透镜, 光学系统 F#2, 焦距  $100\ \text{mm}$ ,  $\text{FOV} \approx \pm(5^\circ \times 5^\circ)$ , MTF 接近衍射极限 [23]。为了解决单一均匀介质不能纠正像差的问题, 作者使用更先进的 F-GRIN 自由折射率梯度的介质以控制色差和像差。解决了尺寸大、重量大的问题。光路如图 15 所示。

笔者根据消色差理论设计了一款单片透镜式可见/长波红外环形反射式光学系统, 光学系统 F#1.1, 焦距为  $28\ \text{mm}$ , 采用像元尺寸为  $24\ \mu\text{m}$  探测器,  $\text{FOV} \approx \pm(7.2^\circ \times 7.2^\circ)$ , 总长  $\leq 30\ \text{mm}$ , 畸变  $< 2\%$ , MTF 接近衍射极限。四个反射表面均选用高次偶次非球面, 为了消除像差, 孔径光阑设置在第二个反射面上。光学系统反射面拟合在一个透镜上, 最大程度缩小了系统的长度。此设计将两个波段成像在同一焦面上, 各反射面拟合在一个透镜, 解决了多波段共孔径共焦面光学系统体积大、重量大的问题。并在保证成像质量优良的同时, 提高了系统的视场角。可见/长波红外环形反射式光学系统光路及其 MTF 曲线如图 16 所示。



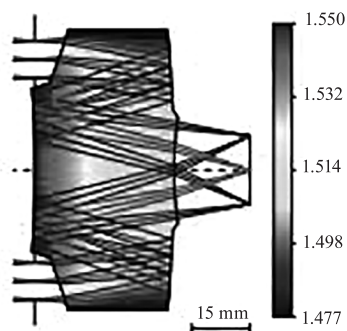
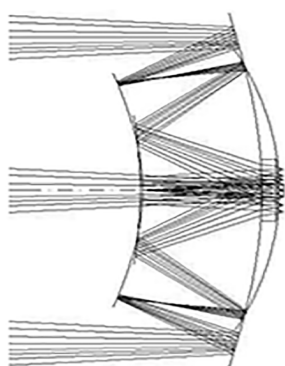
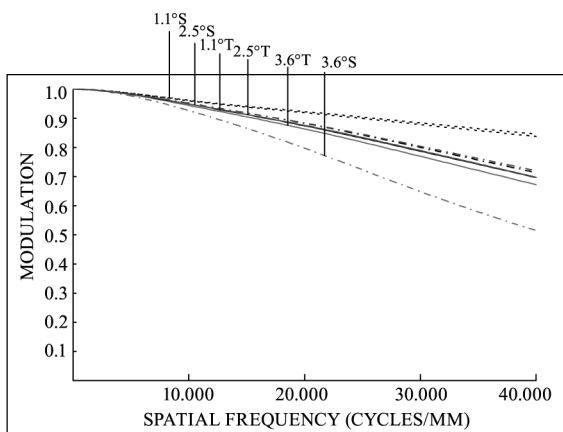


图 15 一种大孔径、高分辨率的环形折叠透镜

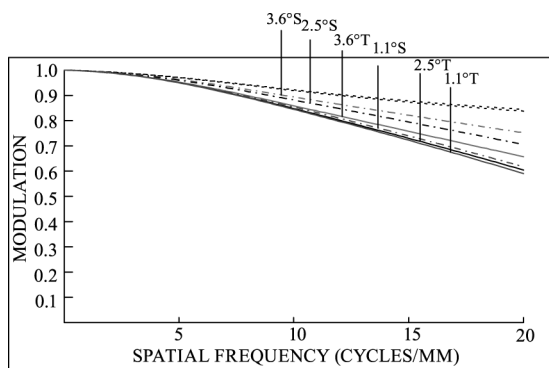
Fig. 15 A large aperture, high resolution circular folding lens



(a) 光学系统示意图



(b) VIS MTF@40lp/mm



(c) LWIR MTF@40lp/mm

图 16 可见/长波环形多反射式光学镜头及其 MTF 曲线

Fig. 16 VIS/LWIR circular reflection optical lens and its MTF curves

环形反射式光学系统是多个反射镜对两个波段光路进行多次折叠,可以显著减小系统的轴向尺寸。根据消色差原理及反射关系,计算遮拦比与视场角之间的关系,从而得到最优反射次数、 $F$ 数与外径尺寸,确定系统的初始结构。环形反射式结构相对于多镜反射式光学系统体积小、视场大,结构紧凑,适用于对于体积要求极小的应用环境。此类结构对于光学加工要求较高,且光学装调存在一定难度,产品价格相对较高,目前未在市场上进行推广与应用。

### 3 结论与展望

#### 3.1 结论

多波段共焦面光学系统有多种结构形式,文中重点介绍了反射式光学系统,对比透射式光学系统,其波段范围更宽、应用场景更加广泛,目前作为导引头、机器视觉等领域的重要应用构型。

对于大视场、宽波段、小体积的设计要求,透射式光学系统越来越受到自身结构形式、光学材料特性的限制。而随着非球面、自由曲面加工检测工艺的进步,折反式光学结构和多反式光学结构凭借光谱范围宽、视场大、体积小等优点在军品、民品市场广泛应用,而环形反射式光学系统因其足够小的体积,适用于军用小体积、轻重量的场景。即便如此,提升产品的指标、降低产品的价格仍是光学设计师的科研重点。

#### 3.2 研究展望

多波段共焦面光学系统是具有重要研究价值的一类光学系统,在多波段光学系统的研究中占据着重要位置,光学设计领域研究人员在近十年来对其进行深入的研究,创造、衍生了多种光学结构形式。通过对国内外光电探测设备领域研究成果的梳理,可以看出尽管目前的研究在多波段光学系统的设计上取得了一定的成果,但是仍有巨大的发展潜力。笔者认为多波段共孔径共焦面光学系统在以下四个方面值得进一步研究:

(1) 新型光学结构。近些年来,多波段光学结构逐渐趋于单一。为了达到理想指标,提高产品的性能,需要创新型多波段光学结构来打破固有视场,这对多波段共孔径共焦面光学系统的发展有着重要意义。

(2) 新型光学材料。为了提高多波段光学系统

的性能,将超表面光学的概念引入到多波段光学的使用中。超表面是一种二维周期性亚波长结构阵列组合的人工材料,具有高度灵活的光响应能力。不仅能控制入射光的相位、振幅、偏振态,拓宽光学系统的视场。并且拥有轻量化的特性,缩小光学系统的体积和重量,避免带来的使用不便的困扰。这也将会是轻量化多波段共孔径共焦面光学系统的未来发展方向。

(3)民用低成本市场需求。对于民用市场来说,产品价格始终是首要因素。随着多波段光学共孔径共焦面系统的发展,缩减所需元件数量、有效控制使用元件的成本至关重要。因此,研究低成本多波段共孔径共焦面光学系统,在减少元件数量、降低元件价格的情况下保持系统优良的成像质量,实现大批量生产,发展使用人群,拓宽使用范围,将会是未来一项重要的研究内容。

(4)军用多波段使用需求。目前多波段探测器件主要使用两个波段,限制了其在夜晚、微光、水汽、烟雾、尘土等复杂环境下的应用。军用产品对比民用产品更加关注产品的应用环境及其性能。随着多光谱光学系统的发展,未来的多波段共孔径共焦面光学系统将涵盖更广泛的波段信息,需要光谱范围更加广泛的探测器件,以适应复杂的使用环境。在这种背景下,拓宽探测器件的工作波段足以引起人们的重点关注。

#### 参考文献:

- [1] Zhang B, Cui Q, Piao M, et al. Design of dual-band infrared zoom lens with multilayer diffractive optical elements [J]. *Appl. Opt.*, 2019, 58(8): 2058 – 2067.
- [2] Wang X, Zhu J. Reflective astronomical telescopes with a large field of view and a wide wave band [J]. *Appl. Opt.*, 2022, 61(17): 5040 – 5048.
- [3] Daniel L. Marks, Nathan Hagen, Mark Durham, et al. Wide-field compact catadioptric telescope spanning 0.7 – 14  $\mu\text{m}$  wavelengths [J]. *Appl. Opt.*, 2013, 52: 4334 – 4342.
- [4] Lippman DH, Chou R, Desai AX, et al. Polychromatic annular folded lenses using freeform gradient-index optics [J]. *Appl. Opt.*, 2022, 61(3): A1 – A9.
- [5] Zhang Kunjie. Military status and trends of infrared common modules in Europe and America [J]. *Infrared Technology*, 2020, 42(7): 697 – 701. (in Chinese)
- [6] Yang L, Liu C, Guo R, et al. Comprehensive polychromatic integral diffraction efficiency sensitivity to tilt error for multilayer diffractive optical elements with oblique incidence [J]. *Appl. Opt.*, 2020, 59(2): 508 – 514.
- [7] Zhang B, Piao M, Cui Q. Achromatic annular folded lens with reflective-diffractive optics [J]. *Opt. Express*, 2019, 27(22): 32337 – 32348.
- [8] Li Yangyang, Yang Jiaqiang, Peng Qingqing, et al. Design of cooled infrared dual band wide angle athermal optical system [J]. *Laser & Infrared*, 2023, 53(5): 712 – 715. (in Chinese)  
栗洋洋, 杨加强, 彭晴晴, 等. 制冷型红外双波段广角无热化光学系统设计 [J]. *激光与红外*, 2023, 53(5): 712 – 715.
- [9] Qu Rui, Yang Hongtao, Mei Chao, et al. A short-wave and long-wave infrared dual-band confocal plane large relative aperture optical system, China: 201621294836 [P] 2023 – 10 – 09. (in Chinese)  
曲锐, 杨洪涛, 梅超, 等. 一种短波、长波红外双波段共焦面大相对孔径光学系统, 中国: 201621294836 [P] 2023 – 10 – 09.
- [10] Deng Jian, Qu Rui, Huang Jianbing. Several ways to realize multi-band common aperture optical imaging system (Invited) [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(6): 20201017. (in Chinese)  
邓键, 曲锐, 黄建兵. 多波段共孔径光学成像系统的几种实现途径 (特约) [J]. *红外与激光工程*, 2020, 49(6): 20201017.
- [11] Mao S, Zhao J. Tolerance analysis on decenter error of multilayer diffractive optical elements based on polychromatic integral diffraction efficiency [J]. *Appl. Opt.*, 2019, 58(9): 2422 – 2428.
- [12] Galan M, Strojnik M, Wang Y. Design method for compact, achromatic, high-performance, solid catadioptric system (SoCatS), from visible to IR [J]. *Opt. Express*, 2019, 27(1): 142 – 149.
- [13] Tumarina M, Ryazanskiy M, Jeong S, et al. Design, fabrication and space suitability tests of wide field of view, ultra-compact, and high resolution telescope for space application [J]. *Opt. Express*, 2018, 26(3): 2390 – 2399.
- [14] Xing Yichen, Wang Yang, Zhang Lei. Annular multireflection visible/short-wave infrared optical lens [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2023, 60(20): 2022001. (in Chinese)

- Chinese)  
邢一臣,王洋,张磊. 环形多反射式可见/短波红外光学镜头设计[J]. 激光与光电子学进展, 2023, 60(20):2022001.
- [15] Meng Qingyu. Overview of three-mirror reflective optical system[J]. Infrared and Laser Engineering, 2022, 51(1): 20210986. (in Chinese)  
孟庆宇. 三镜反射式光学系统综述[J]. 红外与激光工程, 2022, 51(1):20210986.
- [16] Zhao Yuchen, Hu Changhong, Lv Hengyi, et al. Design of high-density coaxial four-mirror optical system with field-bias and multi-light-channel coupled[J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(3):20200197. (in Chinese)  
赵宇宸, 胡长虹, 吕恒毅, 等. 紧凑型偏视场多光路耦合同轴四反光学系统设计[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(3):20200197.
- [17] Li Jie, Luo Hui, Li Jincheng, et al. Design of airborne infrared dual-band imaging optical system based on harmonic diffraction and free-form surface[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(12):1222004. (in Chinese)  
李杰, 罗辉, 李金铨, 等. 基于谐衍射与自由曲面的机载红外双波段成像光学系统设计[J]. 光子学报, 2021, 50(12):1222004.
- [18] Yan Rumeng, Guo Zhongda, Yang Zhiqiang, et al. Multi band infrared off-axis three mirror optical system[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2022, 20(2):146. (in Chinese)  
闫茹梦, 郭忠达, 阳志强, 等. 多波段红外离轴三反光学系统的设计[J]. 光学与光电技术. 2022, 20(2):146.
- [19] Cao Yiqing, Shen Zhijuan. Design of off-axis four-mirror reflective optical system for visible and infrared dual-band[J]. Chinese Journal of Quantum Electronics, 2022, 39(3):324. (in Chinese)  
曹一青, 沈志娟. 可见光/红外双波段离轴四反光学系统设计[J]. 量子电子学报, 2022, 39(3):324.
- [20] Louis Duvéau, Guillaume Druart, Thierry Lepine. Design and manufacture of large field of view thermal infrared catoptriv imaging system in an  $\alpha Z$  configuration[J]. Optics Express, 31, 26659 – 26672 (2023).
- [21] Piao M, Zhang B, Dong K. Design of achromatic annular folded lens with multilayer diffractive optics for the visible and near-IR wavebands[J]. Opt. Express, 2020, 28(20): 29076 – 29085.
- [22] Wang Qi, Piao Mingxu, Meng Yutong, et al. Design of infrared dual-band common path annular aperture ultrathin imaging system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2021, 50(3):20200270. (in Chinese)  
王琦, 朴明旭, 孟禹彤, 等. 红外双波段共光路环形孔径超薄成像系统设计[J]. 红外与激光工程, 2021, 50(3):20200270.
- [23] Zhang C, Piao M, Xie Y, et al. Optical design of a monolithic compressed folding imaging lens for infrared/laser dual-band[J]. Opt. Express, 2023, 31(16):25691 – 25706.