

〈综述与评论〉

## 红外成像光学系统进展与展望

王岭雪<sup>1,3</sup>, 蔡毅<sup>2,3</sup>

(1. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081; 2. 中国兵器科学研究院, 北京 100089;  
3. 纳米光子学与超精密光电系统北京市重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 随着红外焦平面探测器向大面阵、多维度(例如双/多波段)信息获取、高灵敏度的第三代探测器技术发展, 对红外成像光学系统的设计、光学元件加工、光学膜镀制、红外光学系统装调与测试等方面提出了新要求。本文在简述第一代热成像系统红外光学、第二代红外/热成像红外光学的基础上, 梳理了第三代红外/热成像系统对红外光学的要求, 综述了第三代红外成像光学系统解决这些新要求的技术进展, 并展望了新技术的发展趋势。

**关键词:** 红外成像系统; 热像仪; 红外成像光学系统

**中图分类号:** TN223      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1001-8891(2019)01-0001-12

## Recent Progress and Perspectives of Infrared Optical Systems

WANG Lingxue<sup>1,3</sup>, CAI Yi<sup>2,3</sup>

(1. School of Optics and Photonics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. Academy of ordnance science, Beijing 100089, China;

3. Beijing Key Laboratory of Nanophotonics and Ultrafine Optoelectronic Systems, Beijing 100081, China)

**Abstract:** New challenges are emerging in multiple fields along with the development of the third generation infrared detector toward large format, multiple-dimension information acquisition and high sensitivity. These fields include the designing of infrared optical systems, fabrication of optical elements, coating of optical thin films, mounting and measurement of the infrared optical systems. In this work, the first and second generation infrared optical systems are briefly presented. Then the demands for the third generation infrared optical system are analyzed. Finally, the recent progress and perspectives of the third generation infrared optical system are elaborated.

**Key words:** infrared imaging system, thermal imager, infrared optical system

### 0 引言

红外成像光学系统是实现高画质红外/热成像的重要环节。与可见光成像光学系统相比, 红外成像光学系统更复杂也更困难。红外辐射的波长比可见光的大一个数量级, 容易发生衍射; 红外光学材料的折射率大且种类较少, 用不同材料组合进行光学像差校正的选择范围小; 因此对红外成像光学系统与元件面形的设计与加工要求更高。

红外波段的辐射能量与可见光波段的辐射能量相差几个数量级, 为获得足够多的红外辐射能量, 红

外/热成像系统需要采用大孔径成像光学系统; 一般而言, 红外/热成像系统需要观察远距离(例如 5000 m)的场景, 因此需要采用长焦距(例如 200 mm)的光学系统; 为控制红外辐射的衍射, 红外成像光学系统的相对孔径需要取较大值(例如 F 数取值 1~4), 典型可见光相机镜头的 F 数取值 1~22。

第一代热成像技术的发展, 产生了基于光机扫描成像的红外光学系统, 特别是产生了基于锗材料光学元件的长波红外光学系统。

第二代红外/热成像技术发展, 除产生了中波红外、短波红外成像仪对红外成像光学系统的新需求,

收稿日期: 2019-01-10; 修订日期: 2019-01-15.

作者简介: 王岭雪(1973-), 女, 云南石屏人, 副教授, 博士, 主要从事红外成像、图像处理和红外光谱等方面的研究。E-mail: neobull@bit.edu.cn.

基金项目: 国家自然科学基金项目(61471044)。

还产生了非制冷热像仪对红外成像光学系统的新需求，为此，发展了新的红外光学材料、红外光学元件的设计、加工方法，丰富了红外成像光学系统的内容。

目前，红外探测器正在向第三代红外焦平面探测器发展<sup>[1]</sup>，像元规模超过百万像素，探测元尺寸减小至 8 μm 甚至 5 μm，热灵敏度提高至 mK 级，获取的信息维度增加了光谱维（双/多波段）、偏振维（4 个偏振态）等。第三代红外焦平面探测器技术的新特点，导致第二代红外成像光学系统的技术不能很好地满足、甚至不能满足第三代红外/热成像系统的成像要求。换言之，第三代红外焦平面探测器对用于第三代红外/热成像系统的红外光学系统提出了新要求。

本文首先简要回顾了第一代、第二代红外成像光学系统，在此基础上梳理出第三代红外成像光学系统需要解决的新问题，综述了第三代红外成像光学系统解决这些新问题的技术途径和进展，展望了第三代红外成像光学系统的发展趋势。

1 第一代红外成像光学系统存在的问题

在第一代热成像系统中，由于扫描光束的扫描角度较大，一般将光学系统的孔径光阑设置在扫描镜/器之前，孔径光阑较大<sup>[2]</sup>。当目标（例如远距离目标）红外辐射通量密度低于红外成像光学系统（含红外光学元件、支撑结构等）自身红外辐射通量密度时，则红外成像光学系统产生的红外辐射作为主要背景杂散光被红外探测器接收，形成叠加在场景热图像上的“水仙花效应”图像，成为限制第一代热成像系统热灵敏度、影响热图像画质的一个重要因素。

第一代红外成像光学系统存在的问题：

- 1) 红外成像光学系统需要定制，结构复杂，传递函数较低，光学元件数量多，系统装调要求高；
- 2) 不能实现与红外探测器的有效集成，红外成像光学系统的尺寸、重量较大；
- 3) 折射式红外成像光学系统的“水仙花效应”较为严重。

2 第二代红外成像光学系统的特点

为克服“水仙花效应”的影响，第二代红外成像光学系统强化冷屏设计，将冷屏效率提高至 100%，使背景杂散光的影响减到最小；采用二次成像模式，减小有效入瞳直径和红外物镜体积，在出瞳处设置冷光阑使光阑孔径最小，遮挡住大部分杂散光（图 1<sup>[3]</sup>），提高了成像质量。

在红外/热成像系统的细分应用层面，第二代红外成像光学系统有如下技术特点：

- 1) 发展了无热化技术，改善光学系统因温度变化引起的离焦<sup>[4]</sup>。
- 2) 发展了折射元件表面加工衍射面的混合光学元件和非球面光学元件<sup>[5-6]</sup>，衍射面校正轴向色差和色球差，非球面表面和透镜可以同时消除球差和慧差，提高成像质量，简化光学系统。
- 3) 面向长焦距、远距离红外/热成像系统应用，发展了轴向反射红外光学系统，通过折叠光路减小系统轴向尺寸，如轴向反射的卡塞格林光学系统。因轴向反射系统有较大遮挡，减小了有效入射辐射，又发展了无遮挡的离轴反射系统，如离轴三反红外光学系统。为避免反射镜过多引起新的遮挡，在反射镜之后通常使用折射光学系统将红外辐射会聚于红外焦平面探测器。2011 年，加拿大国家光学研究所的 Min Wang 等人设计了四通道共孔径全反射离轴红外望远镜<sup>[7]</sup>（图 2），4 个波段为 3.4 μm~4.0 μm、8.3 μm~9.3 μm、10.0 μm~11.0 μm 和 11.5 μm~12.5 μm，探测器为 256×1 的线列红外焦平面探测器。
- 4) 面向热瞄镜、单兵热像仪等轻量化、小型化非制冷热像仪的应用，发展了种类繁多的非制冷红外光学系统。图 3 是加拿大国家光学研究所 2006 年设计的折反射光学和微扫描机制的轻量型非制冷热瞄镜<sup>[8]</sup>，焦距 50 mm，视场 9.5°×7.2°。

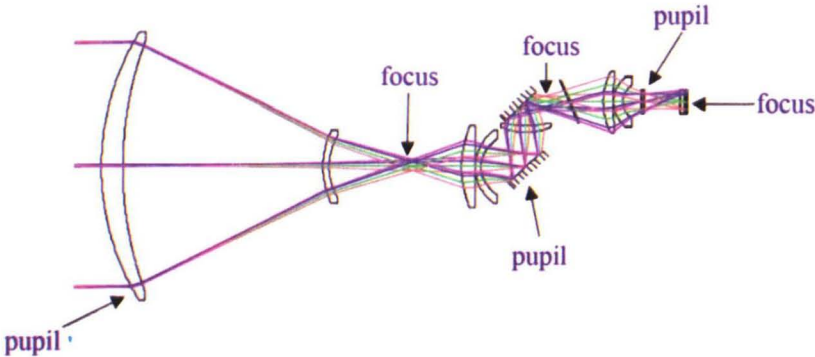


图 1 二次成像光学系统的例子 Fig.1 Example of a re-imaging optical system



- 5) 发展了标准化、通用化和系列化的可更换、固定焦距单视场红外光学系统, 满足高品质、大规模、低成本的应用需求 (图 4 左<sup>[9]</sup>)。
- 6) 发展了光机电一体化的双视场、三视场和大变倍比连续变焦红外光学系统, 满足高性能军事应用 (图 4 右<sup>[9]</sup>)。
- 7) 面向多样化的应用需求, 发展了集成多种技术优势的轻量化、高性能和紧凑的光学系统。例如,

2002 年 Hyun Sook Kim 等人设计了 20:1 变倍比、 $2\times 2$  微扫描的连续变焦中波红外光学系统<sup>[10]</sup>, 2 片反射镜除了减小系统尺寸, 还能分别进行上、下和左、右摆扫, 从而实现  $2\times 2$  微扫描成像。系统紧凑, 长度仅为 206.2 mm, 高度 80 mm, 重量 5.3 kg, 工作波段  $3.7\ \mu\text{m}\sim 4.8\ \mu\text{m}$ , F 数 2.5, 变焦范围 12.75 mm $\sim$ 275 mm, 如图 5 所示<sup>[10]</sup>。

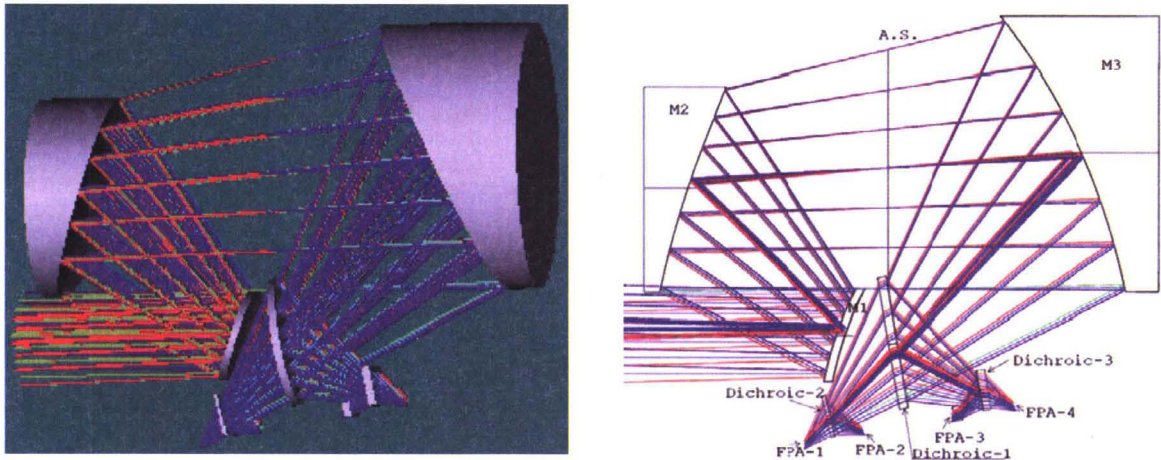


图 2 四通道全反射离轴红外望远镜的三维 (左图) 和二维 (右图) 示意图

Fig.2 Three-(left) and two- (right) dimensional configuration of the four-channel off-axis all reflective IR optical system

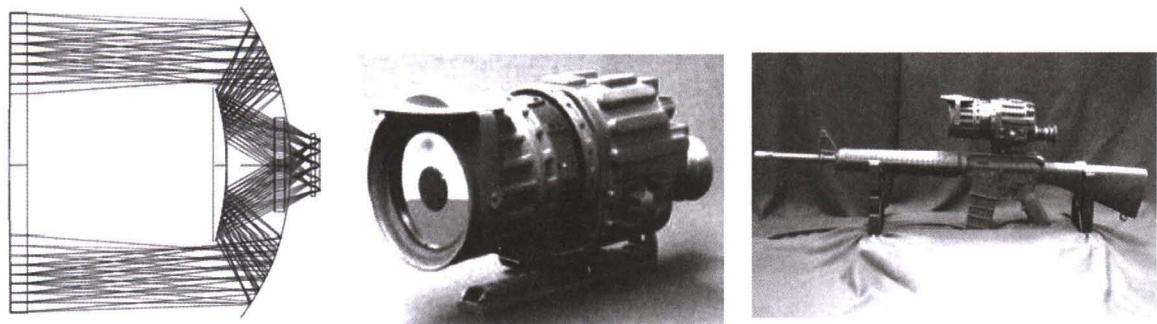


图 3 轻量化非制冷热瞄镜: 光路图 (左图)、热瞄镜最终的实物图 (中图)、安装在突击步枪上的热瞄镜 (右图)

Fig.3 Lightweight thermal weapon sight (TWS): optical layout of the infrared objective (left); TWS final view (middle); TWS mounted on a light assault rifle(right)

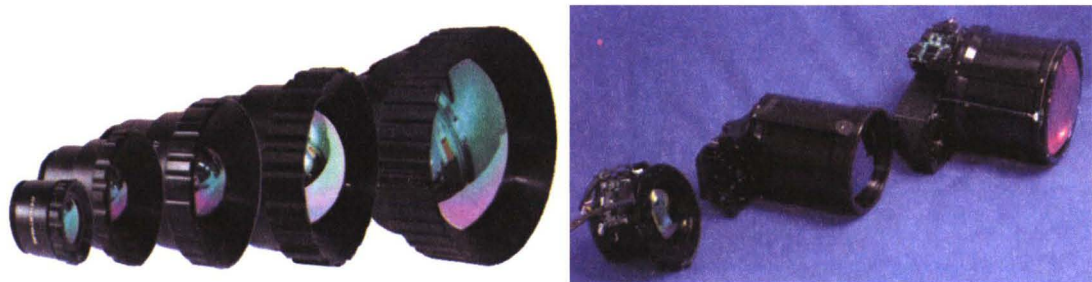


图 4 标准化和系列化的定焦红外光学镜头 (左图); 连续变焦红外光学系统 (右图)

Fig.4 Standard and serialized fixed focal infrared lenses (left). Infrared continuous zoom lenses (right)

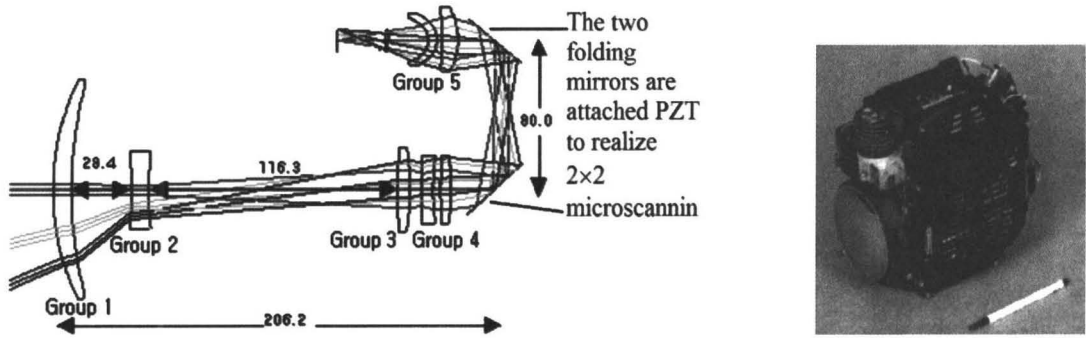


图5 20:1 变倍比、2×2 微扫描的连续变焦中波红外光学系统（左图）；热像仪实物（右图）

Fig.5 A compact mid-wavelength infrared zoom lens with 20:1 zoom range and automatic athermalization (left); The infrared zoom camera prototype(right)

3 第三代红外成像光学系统的研究现状

第三代红外焦平面探测器对红外成像光学系统提出新的要求，具体分析如下：

1) 在保持红外光学系统体积不变条件下，同时优化红外/热成像系统的作用距离和灵敏度。

第二代制冷红外焦平面探测器固定的冷屏F数使得只有唯一的一个光学系统F数才能获得100%的冷屏效率。作用距离（Range）和灵敏度（NETD）的简化数学表达式<sup>[1]</sup>为：

$$\text{Range} = \frac{D\Delta x}{M\lambda} \left( \frac{F^\# \cdot \lambda}{d} \right) \tag{1}$$

$$\text{NETD} \approx \frac{2}{C\lambda(\eta\Phi_b^{2\pi}\tau_{\text{int}})} \left( \frac{F^\# \cdot \lambda}{d} \right) \tag{2}$$

式中：D为入瞳直径；F<sup>#</sup>为F数；λ是波长；M是确认目标Δx所需的像素数；C是场景对比度；d是探测元尺寸；η是探测器收集效率；Φ<sub>b</sub><sup>2π</sup>表示2π视场的背景辐射通量；τ<sub>int</sub>是积分时间。

从式(1)可知，保持红外光学系统体积不变意味着固定入瞳直径D，那么F<sup>#</sup>越大则作用距离越大，但是灵敏度NETD随着F<sup>#</sup>的增大而降低，这说明第二代光学系统中单一的F<sup>#</sup>无法兼顾作用距离和灵敏度的要求。因此，第三代红外光学系统首先是进行变F数设计，同时优化红外/热成像系统的作用距离和灵敏度。

2) 在最小化透镜数量、最大化光学系统透过率的条件下，同时实现中波红外和长波红外波段的清晰成像以及双波段像素级融合成像。

采用叠层像元结构的双波段红外焦平面探测器的特点在于双波段的像元尺寸和像元规模相同，独立的读出电路分别读出双波段数据。设计双波段红外焦平面探测器的红外光学系统时需要考虑的问题有：

- 应将同一场景的双波段红外辐射在不需要重新调焦的情况下会聚在同一个焦平面探测器上，并获得足够高的图像质量；
- 双波段在每个视场时均达到衍射极限；
- 双波段的焦距应相同；
- 双波段的失真应相同；
- 校正因红外光学材料在中波和长波红外波段的色散不同而引起的色差。

针对这些问题，双波段的第三代红外光学系统通过采用共孔径设计，大幅度简化两个波段的视场配准，同时采用光谱宽、色差小、轴向尺寸小、设计灵活的折反射光学系统。另外，还发展了双波段“画中画”红外光学系统。

3) 降低红外/热成像系统的体积、重量、功耗和成本是亘古不变的要求，“没有最好，只有更好”。

针对这个要求，第三代红外光学系统发展了微型光学系统、自由曲面光学系统等。

4) 面向计算成像的红外光学系统，通过智能计算充分发挥光学系统的潜能。

针对这个要求，目前已发展了光学多路成像等。以下分别进行简述。

3.1 发展变F数制冷红外成像光学系统

变F数红外成像光学系统可以充分发挥第三代红外探测器高灵敏度和高空间分辨力（大面阵）优势，在维持原有热成像系统体积的情况下同时优化系统的空间分辨力和灵敏度，提高宽视场搜索目标时的信噪比，维持远距离（即窄视场时）指向和跟踪目标的能力。对于实际应用中有有限的入瞳直径，在窄视场时选择大F数，着重考虑作用距离；宽视场时选择小F数，着重考虑视场和灵敏度；对于双色/双波段、多色/多波段探测器，中波红外波段选择大F数，长波红外波段选择小F数。

变F数红外成像光学系统主要通过改变冷屏孔径



(或冷光阑)的大小来改变F数,从而改变视场。图6左图是F数大小由冷光阑控制、入瞳直径均为17.5mm的双F数、双视场红外光学系统光路原理示意图<sup>[11-13]</sup>, $5.0^{\circ}\times6.6^{\circ}$ 宽视场(Wide Field of View, WFOV)的F数为6.0,有效焦距106mm; $10.4^{\circ}\times13.8^{\circ}$ 超宽视场(Ultra-wide Field of View, XFOV)的F数降低至3.0,有效焦距53mm。图6右图是美国陆军与美国OKSI公司联合研发的光圈快门式可变冷光阑<sup>[11-13]</sup>,集成在红外焦平面探测器杜瓦内。冷光阑由多片叶片组成,通过旋转驱动板即可以调整冷光阑的孔径,黑色、薄且表面镀膜聚四氟乙烯的叶片可快速协调滑动,与红外光学系统变焦同步变化至所需的孔径。

3.2 发展折反式红外成像光学系统

根据折反式红外光学系统光谱宽、色差小、轴向尺寸小、设计灵活的特点,发展了共孔径、双F数、

双/多波段、多视场/大变倍比连续变焦的红外成像光学系统,满足安装空间有限的武器平台对目标搜索、确认和跟踪一体化、自动化的需求。

2008年,Jay Vizgaitis等设计了共孔径的中波/长波红外双波段、四视场(四档变焦)、双F数折反射红外光学系统,四视场为超宽视场XFOV( $10.4^{\circ}\times13.8^{\circ}$ )、宽视场WFOV( $5.0^{\circ}\times6.6^{\circ}$ )、窄视场(Narrow Field of View, NFOV:  $1.9^{\circ}\times2.5^{\circ}$ )和超窄视场(Ultra-narrow Field of View, UFOV:  $0.9^{\circ}\times1.2^{\circ}$ ),如图7所示<sup>[13]</sup>。尺寸较小的无焦反射镜切入光路时获得宽视场WFOV,放大倍率提高2.1倍时获得超宽视场XFOV;平面反射镜移出光路时获得窄视场NFOV,放大倍率提高2.1倍时获得超窄视场UFOV。3个非球面主反射镜对光学系统的入瞳均无遮挡,调制传递函数较好。

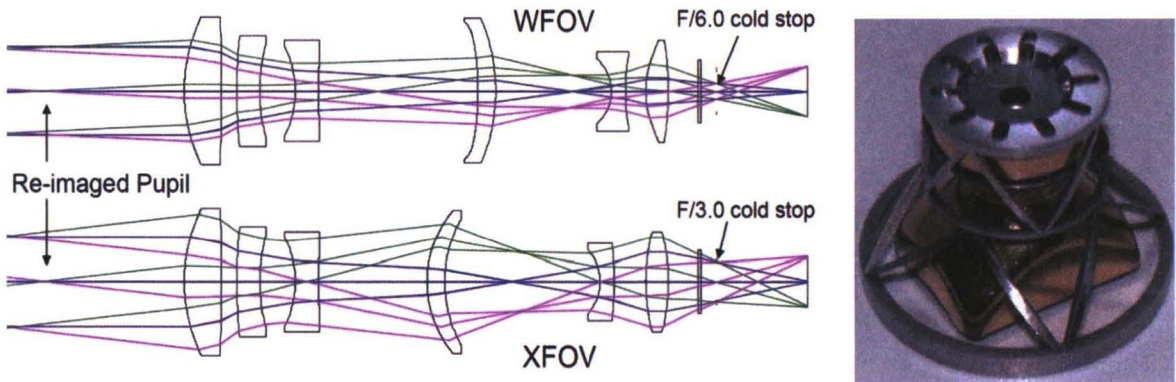


图6 双F数红外光学系统光路原理示意图(左图);光圈快门式可变冷光阑(右图)  
Fig.6 Principle of dual F/number infrared optics (left); Illustration of a variable cold stop (right)

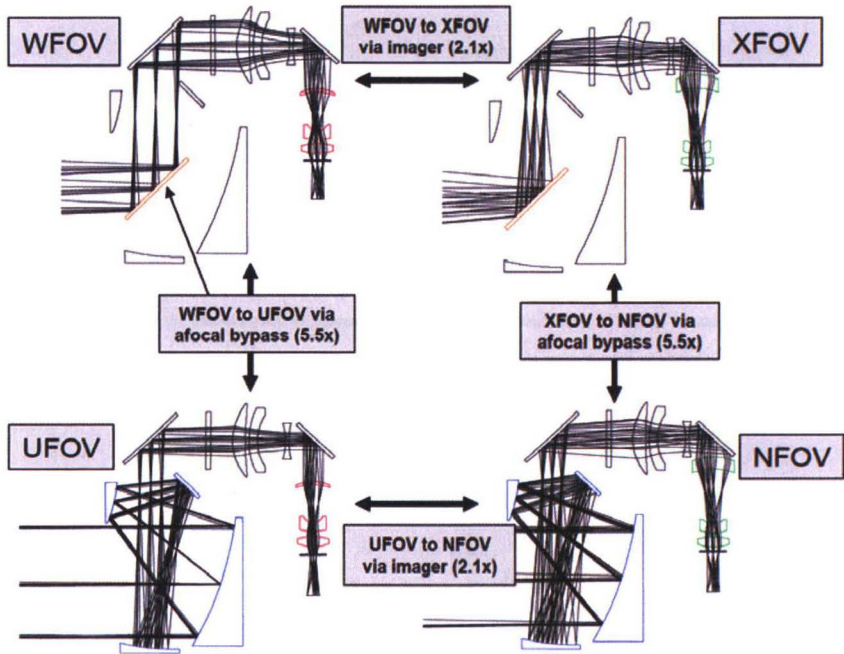


图7 双波段、共孔径、双F数、四视场的折反式红外光学系统示意图  
Fig.7 Catadioptric infrared optics of dual band, common aperture, dual F/number and four FOV

2013 年, Jay Vizgaitis 等报道了图 7 所示系统在超宽视场 XFOV、宽视场 WFOV、窄视场 NFOV 和超窄视场 UFOV 时的中波红外 (Medium Wavelength Infrared, MWIR) 和长波红外 (Long Wavelength Infrared, LWIR) 波段成像效果 (图 8<sup>[14]</sup>), 宽视场用

于搜索目标和态势感知, 窄视场用于远距离识别和分辨目标, 并给出了中波和长波红外波段的彩色融合效果 (图 9<sup>[14]</sup>), 融合图像中用颜色区分中波红外和长波红外, 蓝色表示中波红外信号强, 红色表示长波红外信号强, 白色表示中波红外和长波红外信号相同。

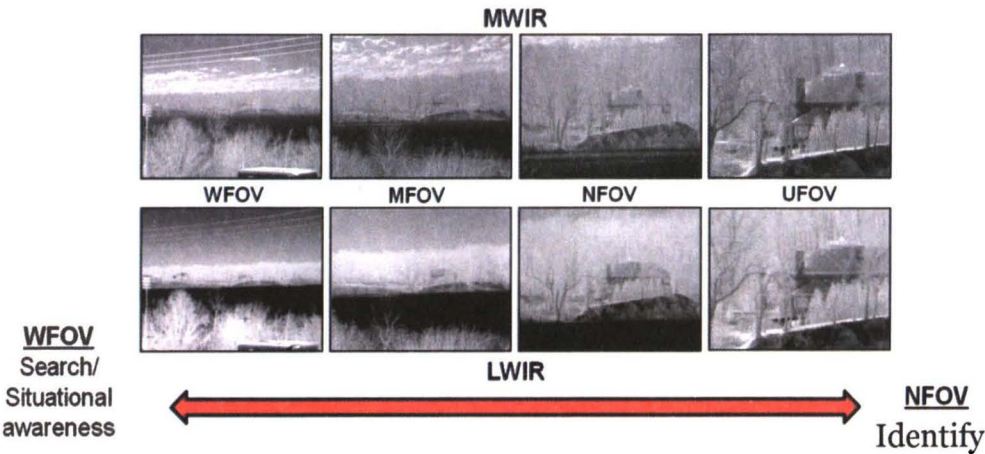


图 8 图 7 系统的双波段、四视场成像效果

Fig.8 Dual-band four-FOV images captured by the thermal imaging system in Fig.7



图 9 图 7 系统的长波红外 (左图)、中波红外 (中图) 图像及其融合图像 (右图)

Fig.9 LWIR (left), MWIR (middle) images and their fused image (right)by the thermal imaging system in Fig. 7

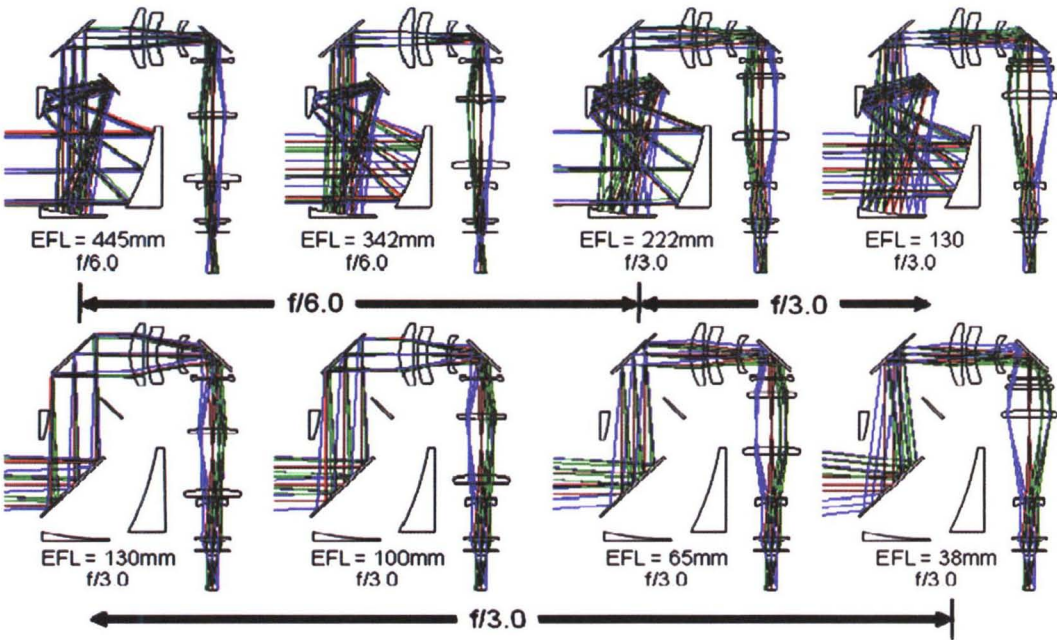


图 10 双波段连续变焦红外光学系统

Fig.10 Dual band infrared continuous zoom lens



相比双波段多视场红外光学系统,双波段连续变焦红外光学系统的设计更为困难,需要在很宽的光谱波段如  $3.5\ \mu\text{m}\sim 11.0\ \mu\text{m}$  范围内实现连续变焦清晰成像。2010年, Jay Vizgaitis 等设计了有效焦距范围  $38\ \text{mm}\sim 445\ \text{mm}$ 、变倍比  $11.7:1$  的共孔径、双波段、双 F 数连续变焦红外光学系统<sup>[15]</sup>(图 10), F 数 3.0 时的有效焦距为  $38\ \text{mm}\sim 130\ \text{mm}$ , F 数 6.0 时的有效焦距为  $130\ \text{mm}\sim 445\ \text{mm}$ , 变倍比  $11.7:1$ , 在变焦范围内同时将中波和长波的红外辐射会聚在同一个双色红外焦平面探测器上成像,精确实现两个波段红外/热图像像素级融合,无需进行复杂的图像处理和像素配准,较好地解决了在视场切换时保持高精度的同轴度(火控系统瞄准需要)的问题。

共孔径、双波段热像仪还可演化为共孔径、多波段/多色红外/热像仪,为像素级图像融合的彩色夜视创造更多的可能性。

3.3 发展双波段“画中画”红外成像光学系统

发展双波段“画中画”红外成像光学系统,在一个画面内通过不同光学倍率的空间信息和光谱信息同时进行目标搜索和识别。

对于常见的地物场景,中波/长波红外双波段焦平面探测器输出的中波和长波红外图像的相关度较高(即图像没有明显的差异),操作者需要在宽视场和窄视场之间反复变焦才能搜索并识别感兴趣的目标。为充分利用双波段焦平面探测器同步获取分离波段信息的能力,并发挥地物场景峰值辐射波长位于长波红外波段、中波红外图像对比度较高的优势,近年来发展了双波段“画中画”红外成像光学系统,用宽视场长波红外图像感知地物场景的态势,用窄视场中波

红外获取对比较高的目标图像。

2013年, Jay Vizgaitis 等设计了分孔径的中波/长波红外双波段“画中画”光学系统<sup>[14]</sup>(图 11),中波红外(MWIR)和长波红外(LWIR)辐射分别从两个孔径入射, MWIR 进入窄视场的离轴四反消像散光学系统之后经中波/长波分束镜(MW/LW beam splitter)与宽视场的 LWIR 辐射合束,共同进入折射式红外光学系统成像,同时获得宽视场的长波红外图像和窄视场的中波红外图像,长波红外宽视场(LWIR WFOV,  $10.0^\circ\times 13.2^\circ$ )利于态势感知和搜索目标,中波红外窄视场(MWIR NFOV,  $1.8^\circ\times 2.4^\circ$ )利于识别和分辨目标,较好地解决了长波红外和中波红外选择的问题。

折反式光学系统分孔径、分光束成像处理与后续图像处理结合,发展出像素级精度对准的“画中画”功能,即在入射光分束(可以是同一波段的红外辐射,也可以是不同波段的红外辐射)后,分别对不同分束光进行处理,例如在宽视场的红外/热图像同时获得窄视场的红外/热图像,将光谱波段与视场组合后以满足多种应用,例如:

- 长波红外图像/宽视场, 长波红外图像/窄视场;
- 中波红外图像/宽视场, 中波红外图像/窄视场;
- 长波红外图像/宽视场, 中波红外图像/窄视场;
- 中波红外图像/宽视场, 长波红外图像/窄视场;
- 长波红外图像/宽视场, 短波红外图像/窄视场;
- 短波红外图像/宽视场, 长波红外图像/窄视场;
- 可见光图像/宽视场, 长波红外图像/窄视场;
- 长波红外图像/宽视场, 可见光图像/窄视场。

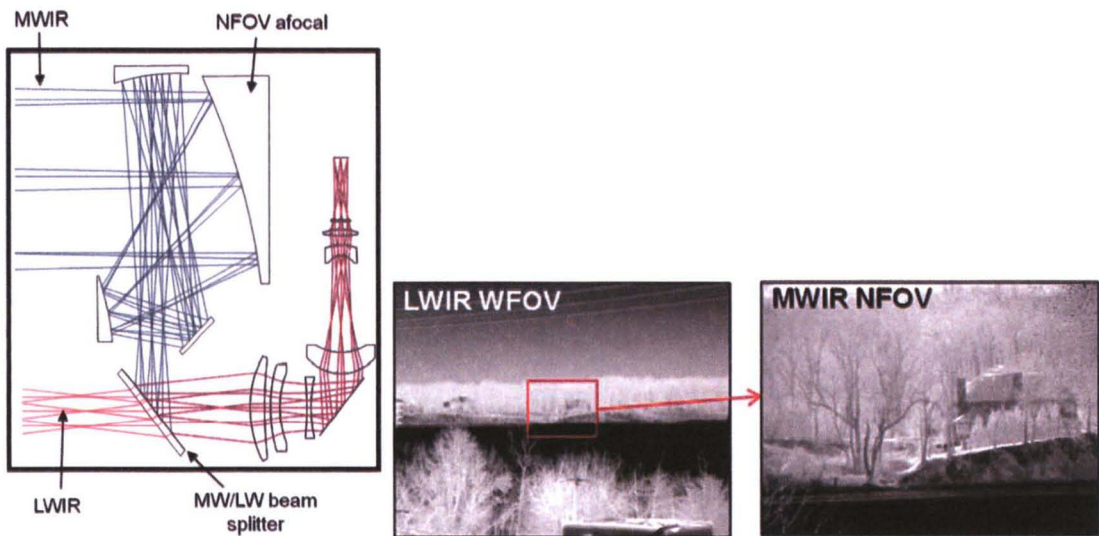


图 11 双波段“画中画”红外光学系统设计示意图(左图)及其成像效果(右图)  
Fig.11 Dual band infrared picture-in-picture system (left) and its imaging results (right)



3.4 发展折反射周视红外成像光学系统

根据第三代红外焦平面探测像元规模大的优势，发展了基于二次曲面反射镜的折反射周视红外成像光学系统，用单个红外焦平面探测器记录宽视场甚至 360°周视视场信息，满足红外警戒和告警的需求。

2010 年，美国海军实验室研制了俯仰角范围为 10°~30°、方位角范围 360°的折反射周视红外成像系统作为潜艇的潜望镜<sup>[16]</sup>，如图 12 所示，图中的两个曲面镜为抛物面镜，使用的红外焦平面探测器为 2048×2048 像元规模的碲化铟（InSb）中波红外焦平面探测器。这种单视图型周视系统的特点是只使用一个面阵探测器、通过一幅视图直接得到周视视场景象，实现凝视型的周视成像，可以完整记录 360°全方位实景空间内重要事件的发生、持续和结束<sup>[17]</sup>。

3.5 发展自由曲面红外成像光学系统

在先进光学制造和测量技术的支持下，发展自由曲面红外成像光学系统，解决扩宽视场、校正像差、简化光学系统结构、控制体积、减轻重量等问题。

自由曲面提供非旋转对称的复杂几何形状，支持非常规的图像获取和像差校正。2014 年，美国罗切斯

特大学的 Kyle Fuerschbach, Jannick P. Rolland 和 Kevin P. Thompson 指出<sup>[18]</sup>，使用现有的像差理论即可完整地描述自由曲面，这个研究发现让光学设计者打破旋转对称的限制，根据目前的数学模型设计任意形状的自由曲面，获得完全无遮挡、完全由反射光学元件构成的红外光学系统。3 位研究者还设计验证了只使用 3 片自由曲面的全反射式红外光学系统<sup>[19]</sup>，衍射极限低至 5 μm，F 数 1.9，对角线视场 10°的高紧凑度、高热稳定性和轻量化的光学系统，不需要折叠镜就可安装在结构复杂的三维空间内，如图 13 所示<sup>[19]</sup>。

3.6 发展微型非制冷红外成像光学系统

发展超薄、微型非制冷红外成像光学系统，满足体积、重量和功耗（SWaP）限制条件下的高性能红外成像要求。

随着非制冷红外焦平面探测器组件体积和重量的大幅度降低，对光路长度小于 1/2 焦距的微型红外成像光学系统的需求日益增加，成本低、加工简单的非球面反射面被广泛用于折叠光路，同时也会使用折射光学元件减小反射面对光路的遮挡。

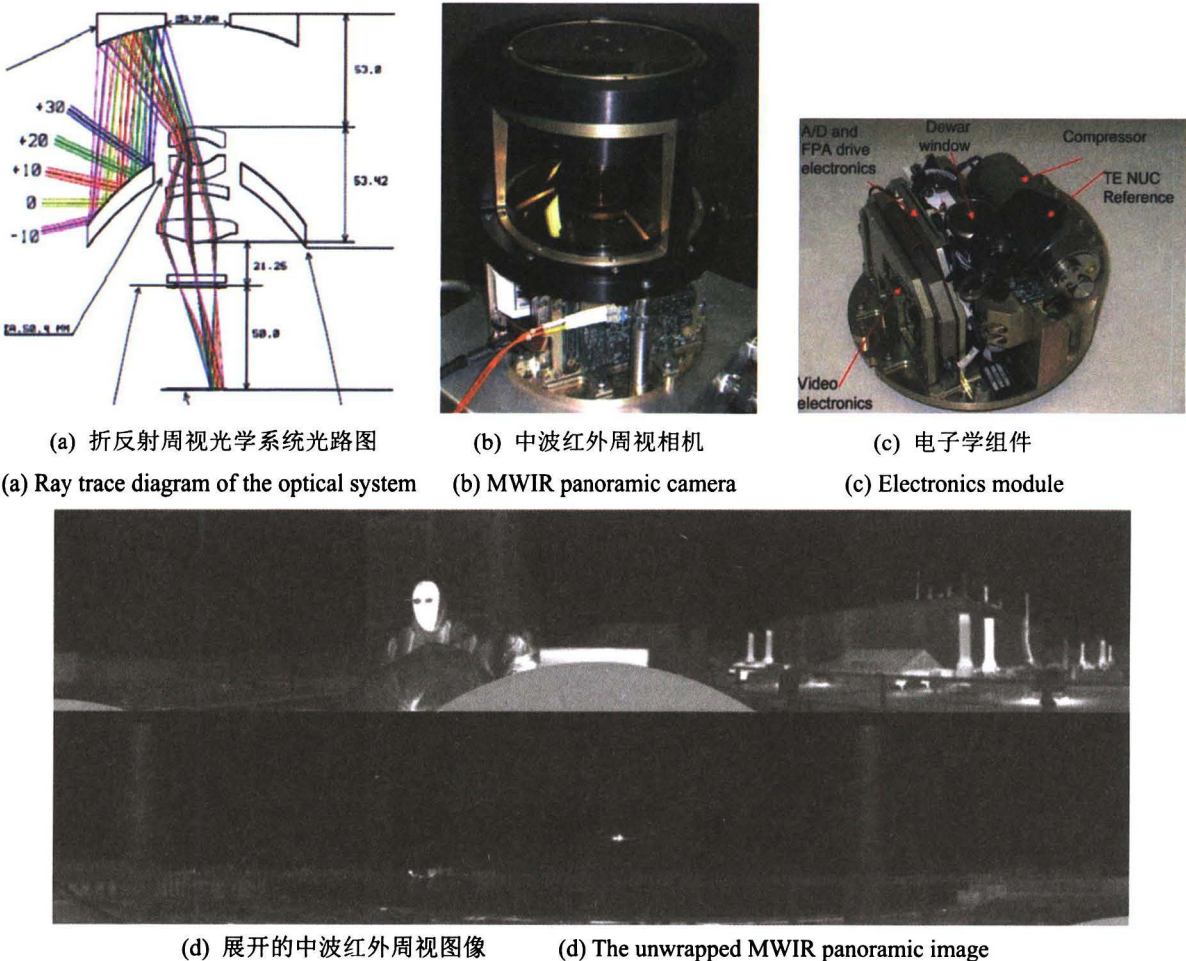


图 12 美国海军实验室开发的中波红外周视潜望镜及成像效果

Fig.12 Midwave infrared panoramic periscope developed by U. S. Naval Research Laboratory and thermal images



2013 年美国杜克大学和 DRS 公司设计了直径 62 mm、厚度 47.1 mm 的微型折反式红外光学系统<sup>[20]</sup>, 光路示意图如图 14 所示<sup>[20]</sup>, F、A 和 C 是反射面, G、E、B 和 D 是折射面, F 数 1.6, 视场 10°, 工作波段 0.7 μm~1.6 μm 和 8 μm~14 μm, 适用于短波/长波双波段红外焦平面探测器。目前只有碲化锌 (ZnSe) 材料的透射波段覆盖 0.7 μm~14 μm 范围, 所以前元件组和后元件组主要采用 ZnSe 材料。

图 15<sup>[20]</sup>是金刚石车削加工、尚未镀膜的后元件组, 图 16<sup>[20]</sup>是组装好的微型折反式红外光学系统。

2014 年, 美国海军实验室研制了使用 4 片同轴的环形非球面反射镜构成的微型红外光学系统<sup>[21]</sup>, 焦距 50 mm, F 数 1.5, 光学窗口直径 28 mm, 光学系统厚

度 15 mm、重量仅为 44 g, 如图 17 所示<sup>[21]</sup>。

3.7 发展计算成像红外光学系统

发展计算成像技术牵引的新型红外成像光学系统, 2015 年, 美国麻省理工学院的 R. Hamilton Shepard 等人提出光学多路成像系统<sup>[22]</sup>, 2017 年验证了中波红外波段的光学多路成像系统<sup>[23]</sup>, 使用分孔径技术 (图 18(a)<sup>[23]</sup>) 和反射镜组 (图 18(b)<sup>[23]</sup>) 在光学系统的入瞳处分出 6 路面积相同的子孔径, 再通过压电驱动反射镜形成微位移的方式对子孔径图像进行编码, 编码后的光学图像投影到同一个红外焦平面探测器上 (图 18(c)<sup>[23]</sup>), 后期再通过图像重构算法获得大视场的重构图像 (图 19<sup>[23]</sup>)。

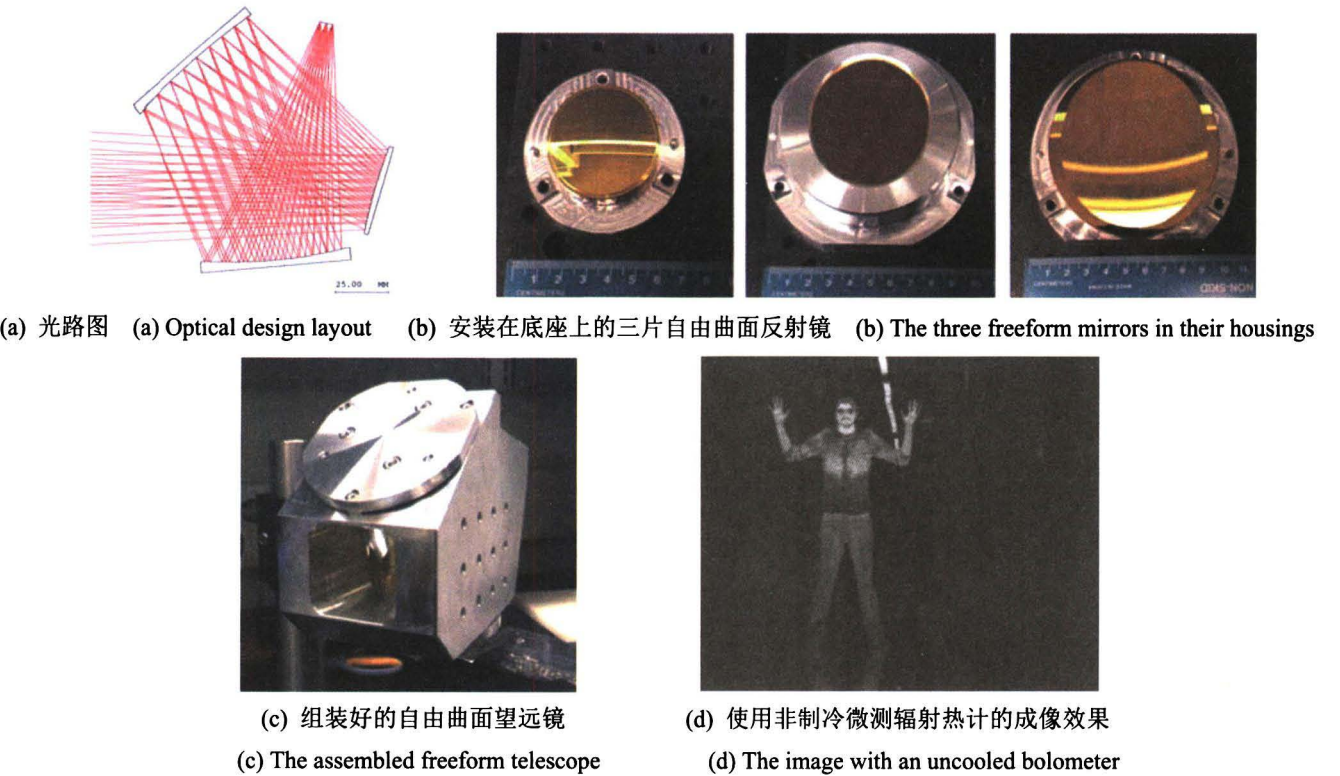


图 13 使用 3 片自由曲面的红外光学望远镜及其成像效果 Fig.13 Three-mirror freeform infrared telescope and its imaging results

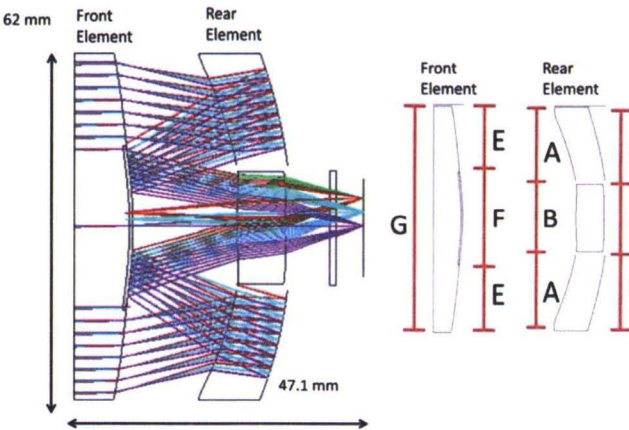


图 14 美国杜克大学和 DRS 公司研制的微型折反式红外光学系统  
Fig.14 Wide-field compact catadioptric telescope developed by Duke University and DRS

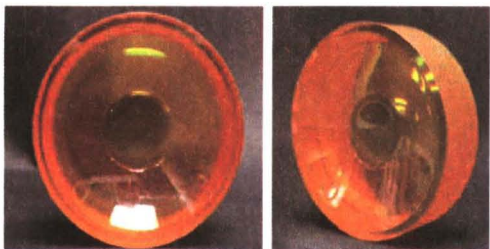


图 15 金刚石车削加工、尚未镀膜的后元件组

Fig.15 The rear optic after diamond turning but before coating

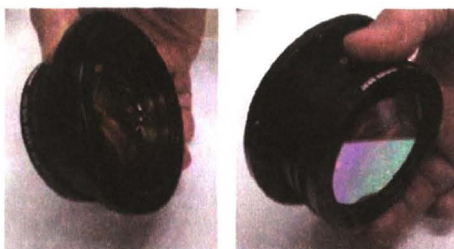
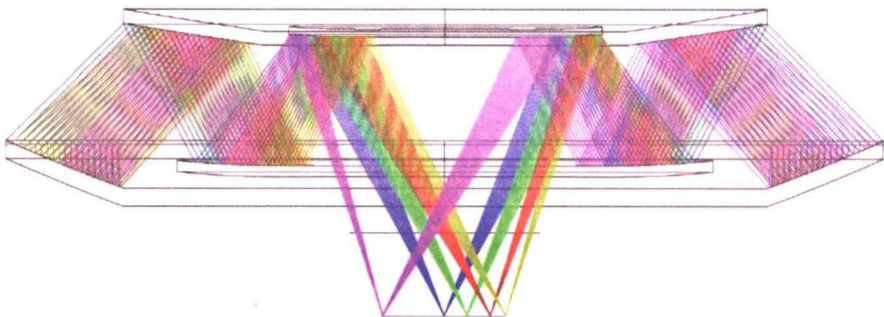
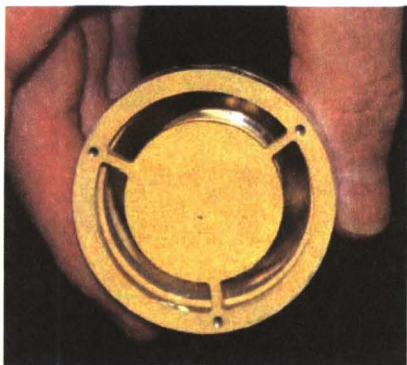


图 16 组装好的微型折反式红外光学系统

Fig.16 The completed telescope



(a) 光路图 (a) Optical design layout



(b) 镜头组件

(b) The lens assembly

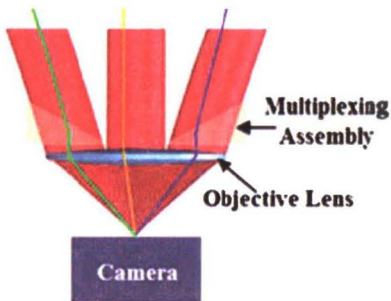


(c) 组装好的微型非制冷热成像组件

(c) The complete compact uncool thermal imager module

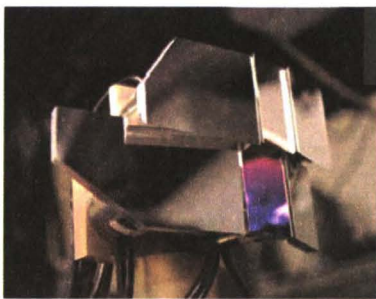
图 17 由 4 片同心环形反射镜构成的微型红外光学系统及其成像组件

Fig.17 Compact infrared lens consisted with 4 annular concentric aspheric mirrors and its uncool thermal imager module



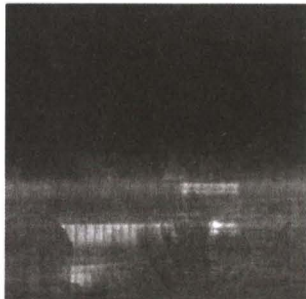
(a) 分孔径示意图

(a) Optically multiplexed imaging with division of aperture



(b) 6 面反射镜组

(b) Six-facet multiplexing mirror assembly



(c) 子孔径图像

(c) One multiplexed image

图 18 麻省理工学院的分孔径光学多路成像

Fig.18 Optically multiplexed imaging method proposed by MIT



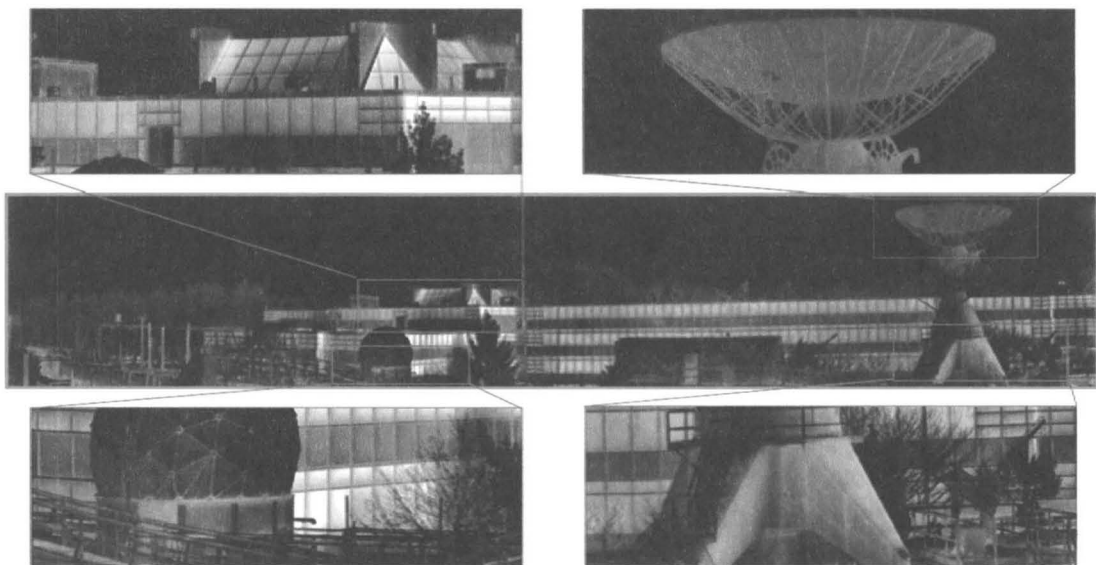


图 19 由子孔径图像重构得到的大视场图像

Fig.19 The reconstructed image with multiplexed images

4 展望

红外成像光学系统正通过减小自身的尺寸，从物镜延伸至红外焦平面探测器芯片及其信号处理电路。光学元件单元的尺寸减小至与探测器尺寸相同时，可实现像素级的光谱、偏振、相位编码等操作。例如 Sanjay Krishna 2009 年提出的“红外视网膜”<sup>[24]</sup>，将红外探测器的每个像元当作视网膜中的一个锥状细胞，通过后期的信息处理技术把这些细胞间的相互作用进行耦合，从而模仿人眼感知场景信息、认知场景态势的功能；当光学元件单元进一步减小至微米或纳米尺度时，由于表面效应、体积效应和量子尺寸效应的影响，其光学性能将表现出与宏观光学元件单元显著不同的特点，如超强的吸收、增透<sup>[25-26]</sup>或会聚<sup>[27]</sup>性能。可以说，红外光学系统的发展趋势是与红外探测器融为一体，纳米光子学已成为发展第四代红外焦平面探测器的源动力。

新的红外光学材料和镀膜技术也在蓬勃发展<sup>[28-29]</sup>，由于篇幅所限，本文略过此部分内容。

参考文献:

[1] Rogalski A. Next decade in infrared detectors[C]//*Proc. of SPIE*, 2017, **10433**: 104330L.

[2] Robert E Fischer, Thomas U Kampe. Actively controlled 5:1 afocal zoom attachment for common module FLIR[C]//*Proc. of SPIE*, 1992, **1690**: 137-152.

[3] Jay Vizgaitis. Dual f/number optics for third generation FLIR systems[C]//*Proc. of SPIE*, 2005, **6043**: 604328.

[4] Philip J Rogers. Athermalization of IR optical systems[C]//*Proc. of SPIE*, 1991, **10260**: 102600F.

[5] Philip J Rogers. Use of hybrid optics in the 3-5 $\mu$ m infrared band[C]//*Proc. of SPIE*, 1995, **2540**: 13-20.

[6] Chris Bigwood, Andrew Wood. Two-element lenses for military applications[J]. *Optical Engineering*, 2011, **50**(12): 121705.

[7] WANG Min, François Châteauneuf, Christian Proulx. Optical designs of compact multichannel and all-reflective system for infrared imaging[C]//*Proc. of SPIE*, 2011, **8012**: 801226.

[8] A Bergeron, H Jerominek, M Doucet, et al. Lightweight uncooled TWS equipped with catadioptric optics and microscan Mechanism[C]//*Proc. of SPIE*, 2006, **6206**: 62061N.

[9] New England Optical System. Standard Lenses for Commercial Focal Plane Arrays[EB/OL]. (2018-03-03) [2019-01-13]. <http://www.neos-inc.com/neos-mwir-lenses.html>.

[10] H S Kim, C W Kim, S M Hong. Compact mid-wavelength infrared zoom camera with 20:1 zoom range and automatic athermalization[J]. *Optical Engineering*, 2002, **41**(7): 1661-1667.

[11] Jay N Vizgaitis. Dual f/number optics for 3rd generation FLIR systems[C]//*Proc. of SPIE*, 2005, **5783**: 875-886.

[12] Nahum Gat, Jingyi Zhang, Ming De Li, et al. Variable Cold Stop for Matching IR Cameras to Multiple f-number Optics[C]//*Proc. of SPIE*, 6542: 65420Y.

[13] Jay Vizgaitis. Third Generation Infrared Optics[C]//*Proc. of SPIE*, 2008, **6940**: 69400S.

[14] Jay N Vizgaitis, Arthur Hastings Jr. Dual band infrared picture-in-picture systems[J]. *Optical Engineering*, 2013, **52**(6): 061306.

[15] J N Virgaitis. Optical concepts for dual band infrared continuous zoom lens[C]//*Proc. of SPIE*, 2010, **7652**: 76522E.

[16] Jonathan M Nichols, James R Waterman, Raghu Menon, et al. Modeling and analysis of a high-performance midwave infrared panoramic periscope[J]. *Optical Engineering*, 2010, **49**(11): 113202.

[17] 贺宇, 王岭雪, 蔡毅, 等. 折反射周视系统研究进展与展望[J]. 中国光学, 2017, 10(5): 681-698.  
HE Yu, WANG Lingxue, CAI Yi, et al. Research progress and prospect of catadioptric panoramic system[J]. *Chinese Journal of Optics*, 2017, 10(5): 681-698.

[18] Kyle Fuerschbach, Jannick P Rolland, Kevin P. Thompson. Theory of aberration fields for general optical systems with freeform surfaces[J]. *Optics Express*, 2014, 22(22): 26585-26606.

[19] Jannick P Rolland, Kyle Fuerschbach. The Pamplémousse: the optical design, fabrication, and assembly of a 3-mirror freeform imaging telescope[C]//*Classical Optics 2014, OSA Technical Digest*, 2014.

[20] Daniel L Marks, Nathan Hagen, Mark Durham, et al. Wide-field compact catadioptric telescope spanning 0.7-14μm wavelengths[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(18): 4334-4342.

[21] Erin F Fleet, Michael L Wilson, Dale Linne von Berg, et al. Folded path LWIR system for SWAP constrained platforms[C]//*Proc. of SPIE*, 2014, 9070: 907029.

[22] R Hamilton Shepard, Yaron Rachlin, Vinay Shah, et al. Design architectures for optically multiplexed imaging[J]. *Optics Express*, 2015, 23(24): 31419.

[23] R Hamilton Shepard, Yaron Rachlin, Vinay Shah, et al. Shift-encoded optically multiplexed imaging[J]. *Optical Engineering*, 2017, 56(4): 041314.

[24] Sanjay Krishna. The infrared retina[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2009, 42: 234005.

[25] Jessie Rosenberg, Rajeev V Sheno, Thomas E Vandervelde, et al. A multispectral and polarization-selective surface-plasmon resonant midinfrared detector[J]. *Applied Physics Letters*, 2009, 95: 161101.

[26] Chee Leong Tan, Hooman Mohseni. Emerging technologies for high performance infrared detectors[J]. *Nanophotonics*, 2018, 7(1): 169-197.

[27] ZHANG Shuyan, Myoung-Hwan Kim, Federico Capasso, et al. High efficiency near diffraction-limited mid-infrared flat lenses based on meta surface reflect arrays[J]. *Optics Express*, 2016, 26(14): 18024-18034.

[28] Shyam Bayya, Jasbinder Sanghera, Woohong Kim, et al. New multiband IR imaging optics[C]//*Proc. of SPIE*, 2013, 8704: 870428.

[29] Shyam Bayya, Daniel Gibson, Vinh Nguyen, et al. Expanded IR glass map for multispectral optics designs[C]//*Proc. of SPIE*, 2016, 9822: 98220N.