

文章编号: 1672-8785(2025)04-0020-07

多谱段红外探测器组件的 光学工程化设计

张 璐 李冬冰 付志凯
(华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘 要: 在多谱段红外探测器设计中, 多谱段滤光片是实现焦平面集成分光的关键器件。其谱段拼缝越宽、贴装位置距离探测器越远, 组件响应度非均匀性越差、谱段间串扰越大。基于某 6 谱段 $512 \times 3 \times 6$ 组件开展研究, 通过光线模拟计算提出多谱段滤光片参数和探测器尺寸的设计方法。基于光线模拟计算逻辑设计了一套可迭代计算、优化上述参数的计算程序。提出了滤光片贴装工艺方法, 为后续相似组件的光学设计提供了有益的解决方案。本文设计的多谱段红外探测器滤光片的拼缝宽度为 $30\ \mu\text{m}$, 厚度为 $0.6\ \text{mm}$, 距离探测器 $0.9\ \text{cm}$; 探测器像元尺寸为 $40\ \mu\text{m} \times 40\ \mu\text{m}$, 中心间距为 $900\ \mu\text{m}$ 。组件完成制备验证, 降温时间为 $416\ \text{s}$, 6 谱段响应率非均匀性分别为 10.9% 、 12.5% 、 11.8% 、 11.9% 、 12.3% 和 10.9% , 相邻谱段间无串扰。

关键词: 多谱段红外探测器; 光线模拟; 参数设置; 光学设计

中图分类号: O434.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1672-8785.2025.04.003

Optical Engineering Design of Multispectral Infrared Detector Assembly

ZHANG Lu, LI Dong-bing, FU Zhi-kai
(North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract: In the design of multispectral infrared detectors, multispectral filters are key components for realizing focal plane integrated spectrometry. The wider the spectrum splitter and the farther the mounting position is from the detector, the worse the assembly response non-uniformity and the greater the crosstalk between spectral bands. Based on a 6-band $512 \times 3 \times 6$ assembly, a design method for multispectral filter parameters and detector size is proposed through light simulation calculation. A set of calculation programs that can iteratively calculate and optimize the above parameters is designed based on the light simulation calculation logic. A filter mounting process method is proposed, which provides a useful solution for the optical design of subsequent similar assemblies. The multispectral infrared detector filter designed in this paper has a splitter width of $30\ \mu\text{m}$, a thickness of $0.6\ \text{mm}$, and a distance of $0.9\ \text{cm}$ from the detector; the pixel size of the detector is $40\ \mu\text{m} \times 40\ \mu\text{m}$, and the pixel pitch is $900\ \mu\text{m}$. The assembly has completed preparation verification, the cool-

收稿日期: 2024-06-24

作者简介: 张璐(1995-), 女, 山东东营人, 工程师, 主要研究方向为红外探测器与光学设计。

E-mail: luzbit@163.com

ing time is 416 s, the non-uniformity of the response rate in the six spectral bands are 10.9%, 12.5%, 11.8%, 11.9%, 12.3% and 10.9% respectively, and there is no crosstalk between adjacent spectral bands.

Key words: multispectral infrared detector; light simulation; parameter setting; optical design

0 引言

在红外遥感领域,多谱段红外探测器具有光谱覆盖范围宽、集成谱段数多、单谱段带宽可控等优势,在提高探测器对目标识别能力的同时,还可以极大降低空间红外遥感器的尺寸、质量和成本,因此被广泛应用于防灾减灾、环境监测、资源调查等领域^[1]。

然而,随着红外探测需求的不断提升,多谱段集成红外探测技术面临诸多挑战,比如集成谱段数多、探测器谱段间串扰大^[2]、探测器响应度非均匀性低等。理论上来说,当不同谱段滤光片紧贴在相应谱段正上方且不同谱段滤光片中间无缝隙时,探测器各谱段所有像元均可参与成像,谱段边缘像元不会牺牲。但在实际的多谱段红外探测器的光学工程化设计中,滤光片不同谱段之间存在一定宽度的缝隙,拼接谱段平行度差。为防止探测器表面磨损,滤光片与探测器贴装保留一定间距。因此,滤光片加工和贴装无法达到理论上的效果,进而会影响各谱段的响应度非均匀性,存在谱段串扰问题。

本文介绍了一款 6 谱段(短、中波谱段各 3 个)集成红外探测器组件的光学模拟计算方法,并基于光线计算逻辑设计了一套可快速计算探测器像元尺寸、间距且与滤光片设计尺寸、贴装间距匹配的程序,为后续相似组件的光学设计提供了有益的解决方案。

1 多谱段红外探测器设计

1.1 多谱段红外探测器选型

这种 6 谱段红外探测器组件采用封装杜瓦结构形式^[3],主要由探测器芯片、读出电路芯片、差分处理电路、封装杜瓦结构和制冷机组组成。通过在探测器上方贴装分光滤光片来对器件光谱响应进行限制,从而实现探测器的波段

响应特性。

本文研究的红外探测器的阵列规格为 $512 \times 3 \times 6$,谱段范围为 $3 \sim 11.5 \mu\text{m}$, F 数为 1.8。预设冷屏高度为 30 cm,光敏元尺寸为 $40 \mu\text{m} \times 40 \mu\text{m}$,像元中心间距为 $900 \mu\text{m}$,工作温度为 $70 \pm 3 \text{ K}$ 。通过合理的结构设计^[4]、可靠性设计以及工艺试验,选择冷量适当的制冷机^[5],优化读出电路设计^[6],保证探测器的平均峰值探测率、响应率不均匀性等光电性能以及可靠性达到指标要求。

1.2 光线模拟与建模

根据预设的像元尺寸和谱段间距计算探测器光敏面尺寸。根据系统要求的 F 数和预设的冷屏高度,计算得到冷屏开口直径 D 为 17.35 cm。在目前的工艺水平下,对器件进行背减薄处理(厚度约为 $0.4 \sim 0.5 \text{ cm}$)^[7]。考虑到滤光片安装时的安全性,滤光片下表面距离探测器背面的距离约为 $0.3 \sim 0.4 \text{ cm}$ 。

然后进行多谱段滤光片设计,同时综合考虑滤光片的加工水平和成本。不同谱段拼缝宽度可做到 $30 \mu\text{m}$ 。为降低组件重量,希望滤光片尽量薄。在不影响滤光片强度的前提下,目前市场上此规格滤光片的最小厚度为 0.6 mm 。结合光谱要求选择合适的滤光片材料。常用材料有 Si、Ge、ZnSe 等,本项目选择基片材料为 Ge。

在设计探测器组件的光学接口时,基于光线模拟法对边缘光线路径进行绘制和建模。光线从冷屏开口向不同谱段光敏元边缘辐射。光线成像路径如图 1 所示。为更直观表述,图 1 中模拟光线自左至右称为左一、左二、左三、左四、左五、左六、右六、右五、右四、右三、右二、右一。为了不影响探测器谱段边缘成像、减小谱段间串扰,左二、右六光线交点应高于或落在滤光片上表面,且位于拼缝上

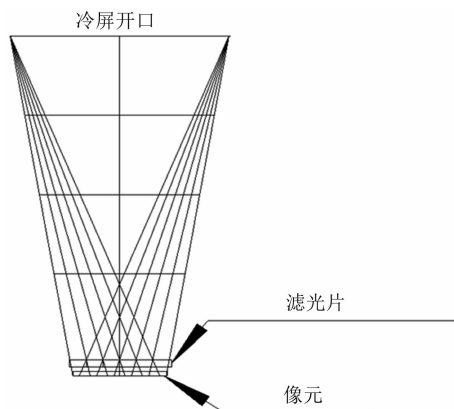


图 1 光线成像路径示意图

方。焦平面位置的光路局部放大图如图 2 所示。测量滤光片与探测器的距离是否满足贴装安全性要求。若不满足要求,则需要迭代调整探测器像元参数、 F 数、滤光片尺寸等。

1.3 多谱段滤光片贴装

设计时还需考虑实际工艺中滤光片贴装时与像元的谱段对应要求,因此在读出电路设计中需要考虑设计闪电标识。实际贴装工艺在工具显微镜下进行,用滤光片拼缝中央对准谱段间的闪电标识。此外,对于滤光片的贴装,通过滤光片支架进行粘接,材料选择可伐金属 4J29,滤光片支架粘接在杜瓦框架上。图 3 为

滤光片贴装示意图。

2 设计程序及验证

2.1 设计程序开发

基于光线模拟计算方法,设计了一种采用 Excel 计算的多谱段红外探测器组件的光学工程化设计方法。建立坐标系,以探测器光敏面为 X 轴,以冷屏开口中心与光敏面中心的连线为 Y 轴。

2.1.1 输入参数

输入像元中心间距、光敏元尺寸、预设 F 数、冷屏高度 H 、滤光片粘接位置与探测器光敏面间距、滤光片厚度等参数。

2.1.2 逻辑计算过程

逻辑计算过程如下:(1)图 2 中谱段 1 与谱段 2 间距称为探测器谱段间距,探测器谱段间距=像元中心间距-光敏元尺寸;(2)谱段 1 左侧坐标为 $(-(\text{单谱段像元宽度} \times 6 + \text{探测器谱段间距} \times 5)/2, 0)$;(3)谱段 1 右侧坐标为 $(\text{谱段 1 左侧坐标} + \text{探测器谱段间距}, 0)$;(4)滤光片上表面位置=滤光片粘接位置与探测器光敏面间距+滤光片厚度;(5)冷屏开口计算公式为 $D=R/H$, F 数计算示意图如图 2 所

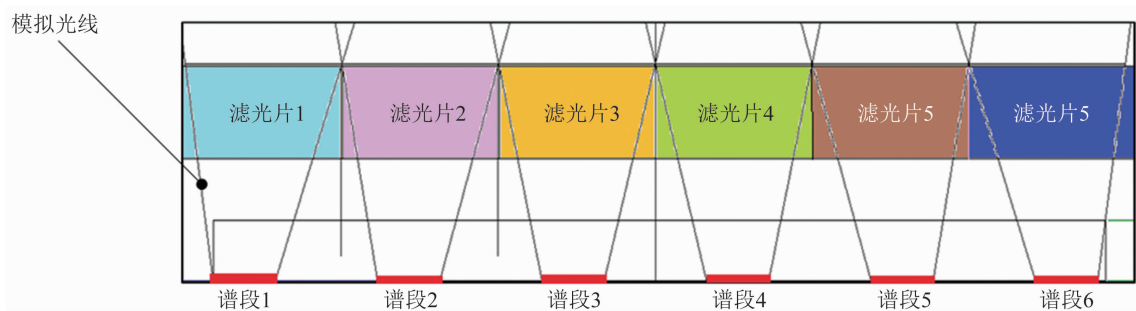


图 2 焦平面位置的光路局部放大图

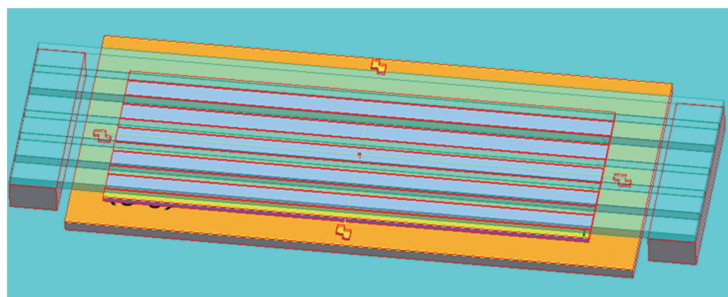
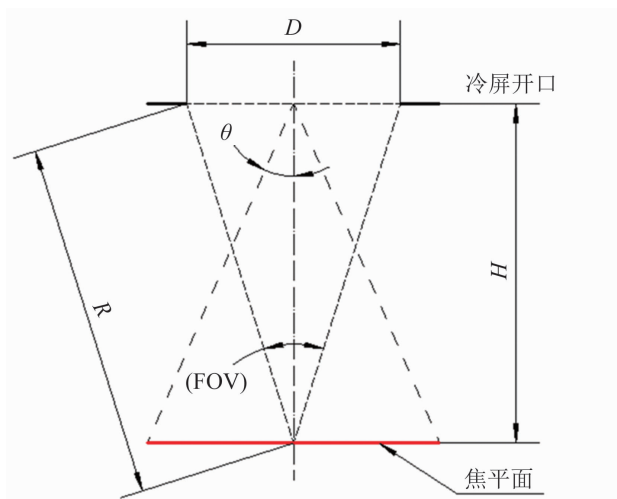


图 3 滤光片贴装示意图

图 4 冷屏 F 数计算示意图

示; (6) 冷屏左右开口坐标为 $(-D/2, H)$ 和 $(D/2, H)$ 。

2.1.3 获取光线交点位置

以前述右五、左二光线交点为例进行计算:

(1) 右五光线经过谱段 1 右侧点 (x_1, y_1) 、冷屏开口右侧点 (x_2, y_2) 两点, 右五光线为 $Y_1 = k_1x + b_1$ 。

(2) 左二光线经过谱段 2 左侧点 (x_3, y_3) 、冷屏开口左侧点 (x_4, y_4) 两点, 左二光线为 $Y_2 = k_2x + b_2$, 计算 k_1 、 b_1 、 k_2 、 b_2 。

(3) Excel 中用到的函数包括 $k_1 = \text{SLOPE}(y_1:y_2, x_1:x_2)$ 、 $b_1 = \text{INTERCEPT}(y_1:y_2, x_1:x_2)$ 、 $k_2 = \text{SLOPE}(y_3:y_4, x_3:x_4)$ 、 $b_2 = \text{INTERCEPT}(y_3:y_4, x_3:x_4)$ 。

2.1.4 判定依据

(1) 判定一: 计算两条光线的交点 $M(x_5, y_5)$:

$$x_5 = (b_2 - b_1) / [(k_1 - k_2)k_1 + b_1] \quad (1)$$

$$y_5 = (b_2 - b_1) / (k_1 - k_2) \quad (2)$$

计算两光线交点纵坐标与滤光片上表面位置的距离。如为正值, 则设计合理。

(2) 判定二: 计算两条光线与滤光片上表面的交点 L_1 (滤光片上表面位置 $-b_1/k_1$, 滤光片上表面位置)、 L_2 (滤光片上表面位置 $-b_2/k_2$, 滤光片上表面位置), 即可算得滤光片拼缝宽度 L 。若 $L \geq 30 \mu\text{m}$, 则设计合理; 如果不合理, 就需要迭代调整探测器像元参数、 F 数、滤光片尺寸参数等。

2.2 组件测试验证

根据前述方法, 本文完成了 6 谱段红外探测器组件的光学工程化设计, 并且进行了组件封装测试。该组件由红外焦平面混成芯片、微型杜瓦、斯特林制冷机构成, 如图 5 所示。

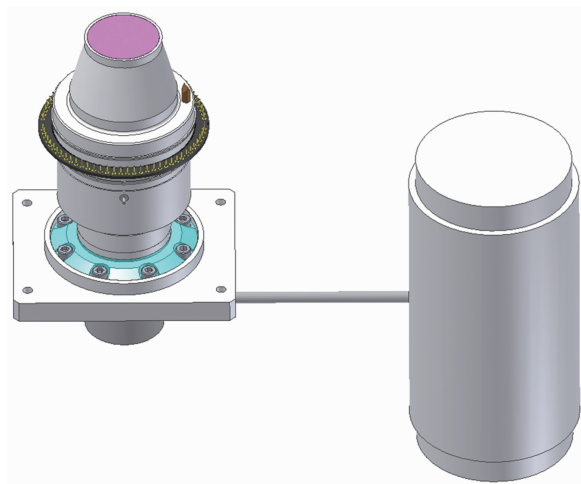
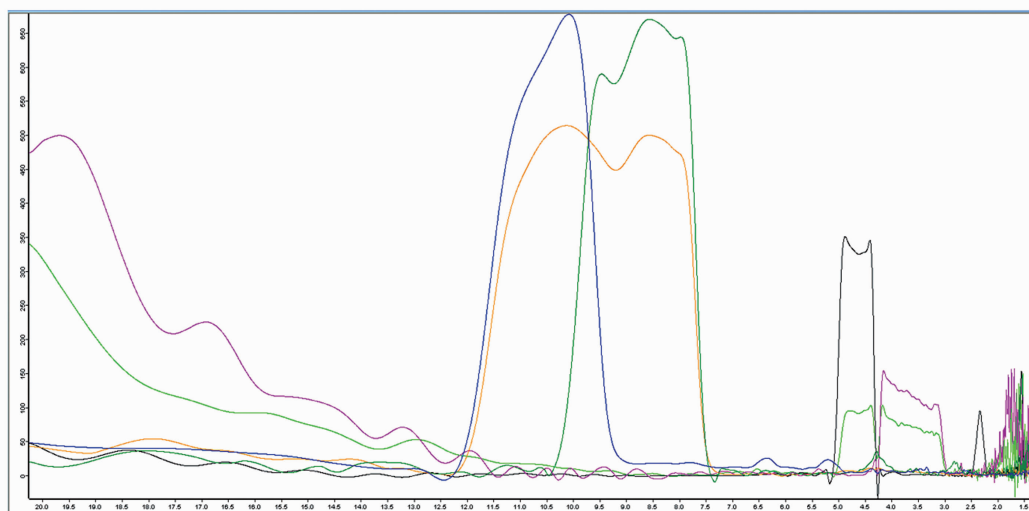


图 5 多谱段红外探测器组件的结构示意图

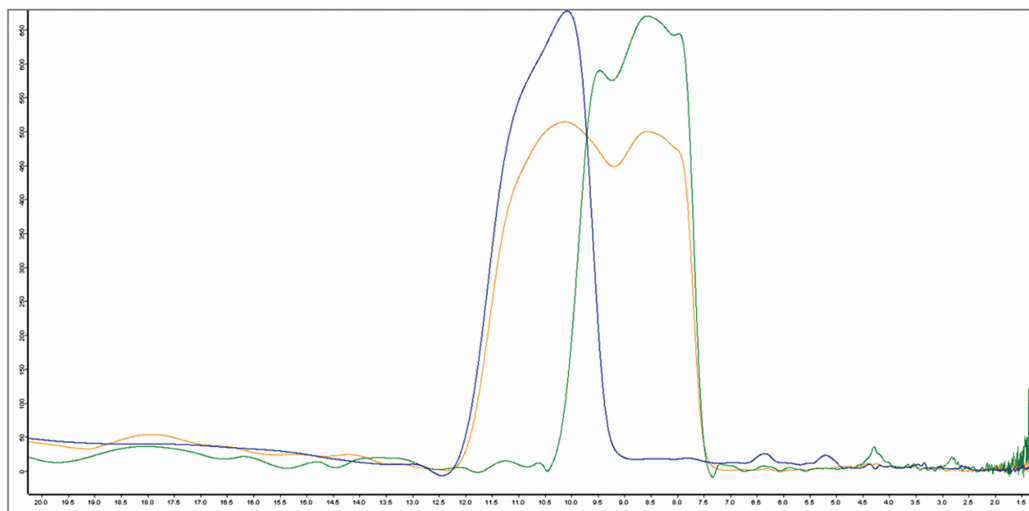
基于上述设计思路, 完成了 6 谱段红外探测器组件研制。依据 GB/T17444-2013 对 $512 \times 3 \times 6$ 探测器的相关参数进行测试 (组件降温时间为 416 s)。表 1 列出了探测器测试参数。

表 1 多谱段红外探测器测试参数

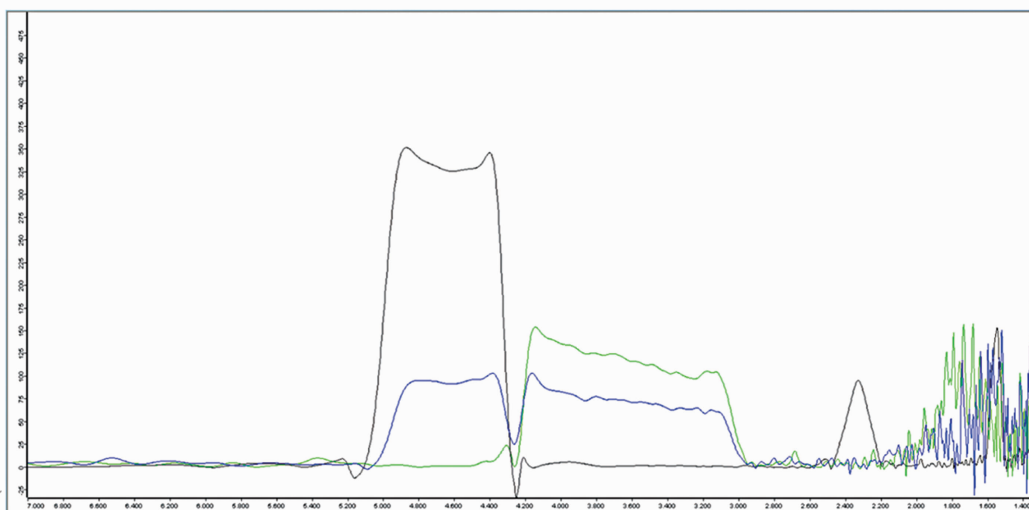
测试参数	谱段 1	谱段 2	谱段 3	谱段 4	谱段 5	谱段 6
波长/ μm	7.7~11.5	7.7~10.0	9.5~11.5	3.0~4.2	4.5~4.9	3.0~4.9
NETD/mK	20.1	24.2	24.4	33.1	28.3	19.4
响应度非均匀性	10.90%	12.50%	11.80%	11.90%	12.30%	10.90%
有效像元率	99.00%	99.20%	99.20%	99.40%	99.60%	99.20%
行频率/kHz	20	20	20	20	20	20
动态范围/dB	69.5	69.2	69.4	70.4	70.5	70.4



(a)全谱段光谱采集图



(b)长波 3 谱段光谱采集图



(c)中波 3 谱段光谱采集图

图 6 组件光谱采集图

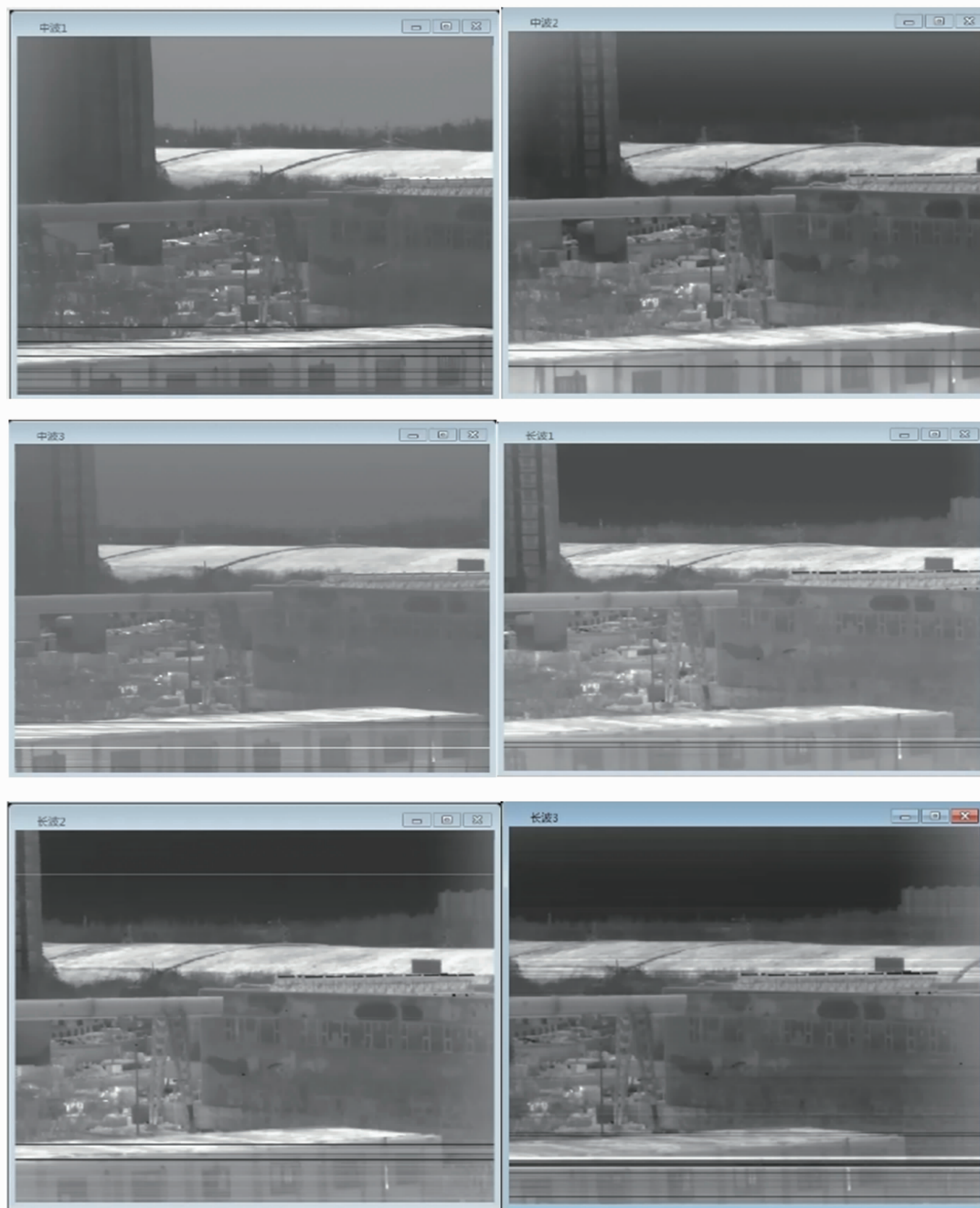


图 7 多谱段红外探测器的图像采集结果

6 谱段响应率非均匀性分别为 10.9%、12.5%、11.8%、11.9%、12.3% 和 10.9%。探测器具有低噪声等效温差 (Noise Equivalent Temperature Difference, NETD)、高行频率、低串扰和高均匀性特征。整机测试 6 谱段光谱响应如图 6 所示, 相邻谱段间不存在光谱串扰。经计算算法校正, 探测器 6 谱段成像图如图 7 所示。

3 结束语

本文介绍了多谱段红外探测器组件的光学工程化设计方法。基于某 6 谱段 $512 \times 3 \times 6$ 红外探测器组件开展研究, 通过光线模拟计算提出多谱段滤光片参数和探测器尺寸 (包括滤光片厚度、拼缝宽度、滤光片贴装位置、探测器像元尺寸、谱段中心间距等) 的设计方法; 然后基于光线模拟计算逻辑设计一套计算程序,

可快速计算、迭代优化上述参数；并且提出滤光片贴装工艺方法。经过计算迭代，本文设计的多谱段红外探测器滤光片拼缝宽度为 $30\text{ }\mu\text{m}$ ，厚度为 0.6 mm ，距离探测器 0.9 cm ；探测器像元尺寸为 $40\text{ }\mu\text{m}\times 40\text{ }\mu\text{m}$ ，中心间距为 $900\text{ }\mu\text{m}$ 。组件完成制备验证，降温时间为 416 s ，6 谱段响应率非均匀性分别为 10.9% 、 12.5% 、 11.8% 、 11.9% 、 12.3% 和 10.9% ，相邻谱段间无串扰。本文提出的多谱段红外探测器设计思路既遵从工艺可实现性，又考虑了探测器的实际加工成本。从工程化的角度提出多谱段红外探测器部分合理的设计参数，并完成了探测器的测试验证。这对于推动多谱段红外探测器工程化设计具有一定意义。该方法目前仅在 Excel 计算程序中实现，后续可借助 Python 或其他软件设计编写程序界面，使得操作更加便捷。

参考文献

- [1] 孟令伟, 东海杰, 张懿. 多谱段集成长线列红外探测器研究进展 [J]. 激光与红外, 2020, 50(6): 697–702.
- [2] 翟文生. 资源遥感用红外多谱段探测器组件性能探讨 [J]. 红外与激光工程, 2005, 34(1): 8–10.
- [3] 吕玮东, 邓旭光, 王乾威, 等. 空间用红外探测器拼接技术研究 [J]. 红外技术, 2022, 44(10): 999–1008.
- [4] 徐丽娜, 东海杰, 赵艳华, 等. 多谱段集成长线列拼接 TDI 红外探测器技术 [J]. 上海航天, 2019, 36(S2): 112–116.
- [5] 栗晓云, 戴立群, 徐丽娜, 等. 空间长线阵多谱段红外探测器的制冷控制方法研究 [J]. 低温与超导, 2015, 43(2): 34–36.
- [6] 王成刚, 刘泽巍, 袁媛, 等. 多谱段线列红外探测器读出电路设计优化 [J]. 激光与红外, 2017, 47(6): 736–739.
- [7] 王成刚, 东海杰, 刘泽巍, 等. “高分五号”卫星多谱段集成 TDI 线列红外探测器 [J]. 航天返回与遥感, 2018, 39(3): 80–84.