



基于红外多光谱相机分析长后焦距对无热化设计的影响

徐皖焱 徐亮 沈先春 徐寒杨 孙永丰 刘文清 刘建国

Analysis of influence of long back focal length on athermal design based on infrared multispectral camera

Xu Huan-Yao Xu Liang Shen Xian-Chun Xu Han-Yang Sun Yong-Feng Liu Wen-Qing Liu Jian-Guo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 184201 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210217

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210217>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

中波红外微型静态傅里叶变换光谱仪的设计与分析

Design and analysis of medium wave infrared miniature static Fourier transform spectrometer

物理学报. 2018, 67(6): 060702 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20172599>

偏振成像激光雷达与短波红外复合光学接收系统设计与分析

Design and analysis of polarization imaging lidar and short wave infrared composite optical receiving system

物理学报. 2020, 69(24): 244202 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20200920>

光源光谱特性对空间相机调制传递函数检测的影响

Influence of spectral characteristics of light sources on measuring space camera modulation transfer function

物理学报. 2021, 70(13): 134208 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201575>

高分五号卫星多角度偏振相机最优化估计反演: 角度依赖与后验误差分析

Optimal estimation retrieval for directional polarimetric camera onboard Chinese Gaofen-5 satellite: an analysis on multi-angle dependence and a posteriori error

物理学报. 2019, 68(4): 040701 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181682>

新型长周期光纤光栅的设计与研制进展

Recent progress in design and fabrication of novel long-period fiber grating

物理学报. 2017, 66(7): 070704 <https://doi.org/10.7498/aps.66.070704>

基于球面反射温帘的红外探测器变 f 数设计

Design of varying f /number of cooled infrared detectors based on spherical reflecting warm shield

物理学报. 2017, 66(15): 150701 <https://doi.org/10.7498/aps.66.150701>

基于红外多光谱相机分析长后焦距 对无热化设计的影响*

徐皖垚¹⁾²⁾ 徐亮^{1)†} 沈先春¹⁾ 徐寒杨¹⁾
孙永丰¹⁾²⁾ 刘文清¹⁾ 刘建国¹⁾

1) (中国科学院合肥物质科学研究院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

2) (中国科学技术大学, 合肥 230026)

(2021年1月29日收到; 2021年3月29日收到修改稿)

在不同环境温度下, 热差对红外多光谱相机的成像质量造成一定的影响, 基于此, 建立了红外多光谱相机的无热化模型, 此模型将红外多光谱相机等效为分离式双透镜光学系统. 在定焦距的情况下, 分析了后焦距变长对前后透镜光焦度的影响, 从光焦度绝对值与正负值变化情况对材料的选择范围进行约束, 实现光学材料的快速选择. 采用该模型对波段为 8—14 μm , 焦距为 50 mm, F 数为 1.4 的红外多光谱相机在 -40 — $+60$ $^{\circ}\text{C}$ 范围内进行无热化设计. 通过仿真分析, 各视场在奈奎斯特频率为 30 lp/mm 处的值均达到 0.39, 接近衍射极限; 弥散斑均方根半径均小于艾里斑半径 19.17 μm ; 轴向像差均小于 0.02 mm. 采用通道为 9.43—11.53 μm 的红外多光谱相机对 SF_6 气体进行成像实验, 实验结果表明, 经过无热化的红外多光谱相机对 SF_6 气体的成像效果良好, 设计方法正确可行.

关键词: 红外多光谱相机, 长后焦距, 无热化设计, 折衍混合系统

PACS: 42.15.Eq, 07.07.Df, 07.57.Ty, 42.88.+h

DOI: 10.7498/aps.70.20210217

1 引言

随着社会的快速发展, 突发性污染事故的发生日趋频繁, 例如火灾、化工厂爆炸污染、毒气泄漏等事件使得有毒有害污染气体向大气排放. 而传统的光学遥感和现场采样检测方式无法满足事故处置部门对污染现场快速定性和定量远程遥测的需求^[1-4]. 近年来, 红外多光谱相机以其快速识别、远距离、低成本等显著优势成为气体检测领域的研究热点之一^[5].

由于红外多光谱相机需要在不同温度条件下工作, 温度变化产生的热差会导致成像质量下降,

这严重影响了仪器在不同温度条件下的使用效果^[6]. 相比于可见光光学系统, 红外光学系统的材料热系数高、波段范围大、热差与轴向色差导致的像面偏移更加明显^[7]. 国内外学者针对红外光学系统的无热化设计进行了大量研究: 1943年, Perry^[8]对均匀温度场中光学系统的热效应进行了研究, 首次提出了无热化的概念; 1994年, Tamagawa等^[9]建立无热图挑选材料实现了密接多透镜组的无热化设计, 并在1996年拓展了这一理论, 给出了分离多透镜组的无热化设计实例^[10]; 2012年, Schwertz等^[11]在图解法的基础上, 提出一种扩展的图解法来选择光学材料组合, 适用于特定膨胀系数的外壳. 随着加工技术的进步和衍射光学元件

* 国家重点研发计划 (批准号: 2019YFF0303400)、国家自然科学基金 (批准号: 41941011)、中国科学院前沿科学重点研究项目 (批准号: QYZDY-SSW-DQC016) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: xuliang@aiofm.ac.cn

(diffractive optical element, DOE) 特性的深入研究, 折衍混合光学系统被越来越多地应用于高质量红外光学系统的无热化设计^[12-15]. 但这些设计方法是普适的, 针对长后焦距红外光学系统的无热化设计缺乏具体理论分析, 毫无目的地选取材料会极大增加无热化设计的难度. 鉴于此, 本文基于红外多光谱相机分析了长后焦距对无热化设计的影响, 通过对材料的选择范围进行约束, 可以实现长后焦距红外光学系统材料的快速选择. 同时, 本文提供了一个长后焦距大相对孔径红外多光谱相机的设计实例, 通过仿真分析以及实验结果验证了设计方法的可行性.

2 红外多光谱相机无热化模型

2.1 无热化原理

对于一个具有 K 块薄透镜的光学系统, 分割出 $K-1$ 个空间, 如图 1 所示, L_i 为第 i 块透镜, M_i 为第 i 块透镜的材料, h_i 为近轴光线在第 i 块透镜上的高度.

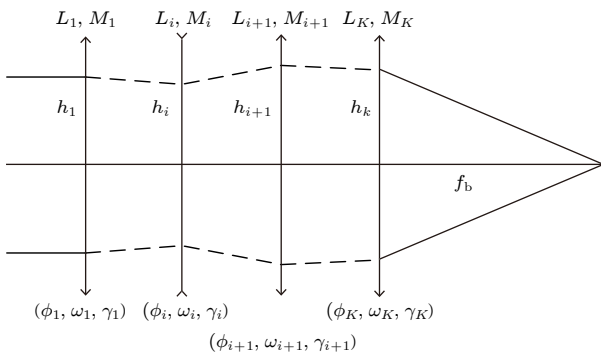


图 1 具有 K 块薄透镜的光学系统

Fig. 1. An optical system containing K thin lenses.

将热差方程通过后焦距 f_b 随温度 T 变化的形式表现出来, 可以得到

$$\frac{\partial f_b}{\partial T} = -\left(\frac{1}{h_1 \phi}\right)^2 \left\{ \sum_{i=1}^k (h_i^2 \gamma_i \phi_i) + \sum_{i=1}^{k-1} \left[(h_i - h_{i+1})^2 \left(\alpha_{\alpha i} - \frac{\partial n_{\alpha i}}{\partial T} \right) \frac{1}{d_i} \right] \right\}, \quad (1)$$

式中, d_i 为第 i 块透镜与第 $i+1$ 块透镜之间的距离, $n_{\alpha i}$ 为空气的折射率, $\alpha_{\alpha i}$ 为空气的线膨胀系数, ϕ_i 为第 i 块透镜的光焦度, γ_i 为 M_i 的热系数, ω_i 为 M_i 的色散系数. 其中, γ_i 和 ω_i 的表达式为^[9]

$$\omega_i = -\Delta \phi_i / \phi_i = -(\partial n_i / \partial \lambda) \Delta \lambda / (n_i - 1), \quad (2)$$

$$\gamma_i = (\partial \phi_i / \partial T) / \phi_i = (\partial n_i / \partial T) / (n_i - 1) - \alpha_i, \quad (3)$$

式中, $\Delta \lambda$ 是所选的波长范围, α_i 和 n_i 分别是透镜材料的线膨胀系数以及中心波长处的折射率. (1) 式中, 大括号内的第 1 项表示透镜光焦度随温度的变化, 第 2 项表示随着 d_i 的变化光学系统光程的变化. 一般来说, 透镜的光焦度变化远大于光学系统的光程变化, 为了便于计算, 大括号内的第 2 项可以忽略不计^[10].

机械件材料的热胀冷缩同样会导致后焦距 f_b 发生变化:

$$\frac{\partial f_b}{\partial T} = \alpha_h f_b, \quad (4)$$

式中, α_h 为镜筒材料的线膨胀系数. 所以消热差的本质就是通过材料的合理搭配使光学系统本身热效应引起的热差与机械件材料热胀冷缩引起的热差相抵消, 再结合光学系统总光焦度 ϕ 方程和轴向色差方程可以获得无热化方程组:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^K \phi'_i = 1, \\ \Delta f_b = \sum_{i=1}^K \omega'_i \phi'_i = 0, \\ \frac{\partial f_b}{\partial T} = \sum_{i=1}^k \gamma'_i \phi'_i = -\alpha_h f_b \phi, \end{cases} \quad (5)$$

式中, $\phi'_i = \frac{(h_i/h_1)\phi_i}{\phi}$, $\omega'_i = (h_i/h_1)\omega_i$, $\gamma'_i = (h_i/h_1)\gamma_i$. ϕ'_i 为归一化后的光焦度值, ω'_i 为加权后的色散系数, γ'_i 为加权后的色热系数, (h_i/h_1) 为各透镜的权值.

2.2 无热化方程组求解

由于长波红外波段光线能量弱, 像面照度公式为^[16]

$$E'_0 = (1 - \rho_1)^{N_1} e^{-\alpha N_2} \pi G \sin^2 U', \quad (6)$$

式中, N_1 为空气和材料的透射界面数, N_2 为光学材料中心厚度总和, ρ_1 为投射界面的反射损失系数, α 为光学材料的吸收系数, G 为物方光束亮度, $\sin^2 U'$ 为光学系统的数值孔径. 通过 (6) 式可以得出结论: 增大相对孔径、减少透镜数量、减小透镜厚度有利于像面照度的提高.

取 $K = 3$, 对无热化方程组进行求解:

$$\begin{cases} \phi'_1 = \frac{\omega'_2(\gamma'_3 + \alpha_h f_b \phi) - \omega'_3(\gamma'_2 + \alpha_h f_b \phi)}{(\omega'_1 \gamma'_2 - \omega'_2 \gamma'_1) + (\omega'_2 \gamma'_3 - \omega'_3 \gamma'_2) + (\omega'_3 \gamma'_1 - \omega'_1 \gamma'_3)}, \\ \phi'_2 = \frac{\omega'_3(\gamma'_1 + \alpha_h f_b \phi) - \omega'_1(\gamma'_3 + \alpha_h f_b \phi)}{(\omega'_1 \gamma'_2 - \omega'_2 \gamma'_1) + (\omega'_2 \gamma'_3 - \omega'_3 \gamma'_2) + (\omega'_3 \gamma'_1 - \omega'_1 \gamma'_3)}, \\ \phi'_3 = \frac{\omega'_1(\gamma'_2 + \alpha_h f_b \phi) - \omega'_2(\gamma'_1 + \alpha_h f_b \phi)}{(\omega'_1 \gamma'_2 - \omega'_2 \gamma'_1) + (\omega'_2 \gamma'_3 - \omega'_3 \gamma'_2) + (\omega'_3 \gamma'_1 - \omega'_1 \gamma'_3)}, \end{cases} \quad (7)$$

其中, 各分式分母的绝对值是无热图中以 (ω'_1, γ'_1) , (ω'_2, γ'_2) , (ω'_3, γ'_3) 为顶点的三角形面积的两倍, 各分式分子的绝对值是无热图中以 $(0, -\alpha_h f_b \phi)$ 分别与 $[(\omega'_2, \gamma'_2), (\omega'_3, \gamma'_3)]$, $[(\omega'_1, \gamma'_1), (\omega'_3, \gamma'_3)]$, $[(\omega'_1, \gamma'_1), (\omega'_2, \gamma'_2)]$ 为顶点的三角形面积的两倍^[17]. 以 ϕ'_1 为例, 如图 2(a) 所示.

Ge, ZnSe, ZnS 作为 L1, L2, L3 的材料, 各透镜的权值为 1, 0.9, 0.8, 镜筒材料的线膨胀系数为 $23.6 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$, 后焦距为 40 mm, 焦距为 50 mm, 表 1 列出了常用长波红外材料在 8—14 μm 波段的热系数及色散系数, 通过无热化方程组求出的 $(\phi'_1, \phi'_2, \phi'_3)$ 为 $(-0.6624, +2.8833, -1.2208)$, 与初始结构的光焦度分配情况相反.

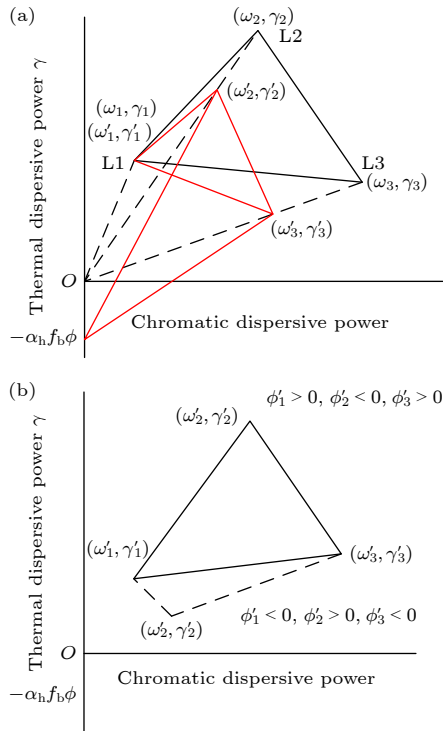


图 2 无热图图解 (a) L1 的归一化光焦度值; (b) 透镜的归一化光焦度正负值

Fig. 2. Graphic illustration of athermal chart: (a) Normalized power value of L1; (b) positive and negative values of normalized power of lens.

在无热化设计中, 在任选材料的情况下, 通过无热化方程组求出的光焦度正负值可能与初始结构的光焦度分配情况不一致, 需要对材料的选择范围进行约束. 假设选用库克三分离物镜作为红外多光谱相机的初始结构, 库克三分离物镜将单凸透镜分为 L1, L3, 各安装在单凹透镜 L2 的前后一定距离处, 形成大体对称式的结构^[18]. 随机挑选材料

表 1 长波红外材料光学特性
Table 1. Optical properties of long wave infrared materials.

Material	$n @ 11 \mu\text{m}$	$\alpha / (10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C})$	$\frac{dn}{dt} / (10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C})$	$\frac{\gamma}{(10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C})}$	$\omega / 10^{-3}$
Ge	4.004	5.7	408	130.137	1.653
ZnSe	2.4	7.1	61	36.471	29.55
ZnS	2.186	6.6	41	27.964	77.392
GaAs	3.273	5.7	149	59.866	16.21
AMTIR1	2.494	12	72	36.191	14.236
IRG201	2.493	12.3	62	29.238	15.208
IRG202	2.4913	16.4	39	9.755	14.285
IRG203	2.582	16.2	39	8.452	16.877
IRG204	2.765	20.9	18	-10.7	10.88
IRG205	2.6	14	70	29.766	15.631
IRG206	2.775	20.7	32	-2.674	10.478
IRG207	2.607	20.3	17	-9.719	9.399

令 $R_i = \gamma'_i + \alpha_h f_b \phi$, $S_T = (\omega'_1 \gamma'_2 - \omega'_2 \gamma'_1) + (\omega'_2 \gamma'_3 - \omega'_3 \gamma'_2) + (\omega'_3 \gamma'_1 - \omega'_1 \gamma'_3)$, 对方程组 (5) 进行简化:

$$\begin{cases} \phi'_1 = \frac{R'_3/\omega'_3 - R'_2/\omega'_2}{S_T} \omega'_2 \omega'_3, \\ \phi'_2 = \frac{R'_1/\omega'_1 - R'_3/\omega'_3}{S_T} \omega'_1 \omega'_3, \\ \phi'_3 = \frac{R'_2/\omega'_2 - R'_1/\omega'_1}{S_T} \omega'_1 \omega'_2. \end{cases} \quad (8)$$

假设, $R'_1/\omega'_1 > R'_2/\omega'_2 > R'_3/\omega'_3$, 连接 (ω'_1, γ'_1) 与 (ω'_3, γ'_3) 作为三角形的底边, 当 (ω'_2, γ'_2) 位于 $(\omega'_1,$

γ'_1)与 (ω'_3, γ'_3) 连线的左侧或下侧时, 三角形朝向坐标轴, S_T 是正值, 则 $\phi'_1 < 0$, $\phi'_2 > 0$, $\phi'_3 < 0$; 当 (ω'_2, γ'_2) 位于 (ω'_1, γ'_1) 与 (ω'_3, γ'_3) 连线的右侧或上侧时, 三角形远离坐标轴, S_T 是负值, 则 $\phi'_1 > 0$, $\phi'_2 < 0$, $\phi'_3 > 0$, 如图 2(b) 所示.

当 $(\phi'_1, \phi'_2, \phi'_3)$ 的正负值与初始结构光焦度分配情况相同时, 根据几何光学中的光线追迹公式可以推导出 (h_i/h_1) 与 ϕ_i 间的函数关系^[16]:

$$\begin{cases} h_3/h_1 = 1 - d_1\phi_1 - d_2\phi_1 - d_2\phi_2 \\ \quad + d_1d_2\phi_1\phi_2 = f_b\phi, \\ h_2/h_1 = 1 - d_1\phi_1. \end{cases} \quad (9)$$

可以看出, (ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3) 需要找到一组对应的 d_i 才可以同时满足消热差且后焦距为 f_b . 但是在实际光学设计中, 受透镜厚度以及光学系统总长度的限制, d_i 的变化是受限制的, 在随机挑选材料的情况下, (9)式不一定能求解出一组合理的 d_i , 需要对材料的选择范围进一步约束. 假设将 Ge, ZnSe, ZnS 替换为 Ge, GaAs, AMTIR1, 此时的 $(\phi'_1, \phi'_2, \phi'_3)$ 为 $(+0.4724, -4.2006, +2.2738)$, 由于各透镜的权值、焦距以及后焦距可通过初始结构确定, 求出 (ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3) 为 $(+0.0049, -0.0933, +0.0568)$, 将 ϕ_1 与 ϕ_2 的值代入(9)式可以求出 $d_1 = 204.08$ mm, $d_2 = -1.265$ mm. 此时, L1 与 L2 的间隔远大于焦距, L2 与 L3 的间隔变为负值, 不符合实际情况.

2.3 长后焦距对无热化设计的影响

对于长后焦距物镜, 像方主面位于 L3 附近, 由 L3 承担主要光焦度. 为了简化分析, 将 L1, L2 等效为前组透镜 L_{front} , 将 L3 作为后组透镜 L_{back} , 则原有的系统被等效为分离式双透镜光学系统^[19]. 等效后的消色散方程可以简化为

$$\omega'_{\text{front}}\phi'_{\text{front}} + \omega'_{\text{back}}\phi'_{\text{back}} = 0, \quad (10)$$

$$\left| \frac{\phi'_{\text{back}}}{\phi'_{\text{front}}} \right| = \left| \frac{1 - \phi'_{\text{front}}}{\phi'_{\text{front}}} \right| = \left| \frac{1}{\phi'_{\text{front}}} - 1 \right| = \left| \frac{\omega'_{\text{front}}}{\omega'_{\text{back}}} \right|. \quad (11)$$

通过消色散方程可以看出, 承担主要光焦度的透镜需要选用较小色散系数的材料且前后组透镜光焦度比例越大, 色散系数比例越小. 分析不同后焦距下光焦度的变化情况, 当后焦距 f_b 增大时, 像方主面 H 后移, 得到如下关系式^[16]:

$$f_b = l'_H - f' = f' \left(1 - \frac{d}{f'_{\text{front}}} \right) = f' (1 - d'\phi'_{\text{front}}), \quad (12)$$

式中, $d' = d/f'$, 后焦距的长度受 d' 与 ϕ'_{front} 的影响, 且两者成反比例函数关系. 由于后组透镜承担主要光焦度, $\phi'_{\text{back}} > |\phi'_{\text{front}}|$, 对(12)式的变化量 ϕ'_{front} 存在限制关系:

$$\begin{aligned} \phi'_{\text{back}} &= 1 - \phi'_{\text{front}} > |\phi'_{\text{front}}|, \\ \phi'_{\text{front}} &< 0.5. \end{aligned} \quad (13)$$

以 $f' = 50$ mm 为例, 结合(12)式与(13)式绘出不同后焦距下前组透镜归一化光焦度的变化情况, 如图 3 所示.

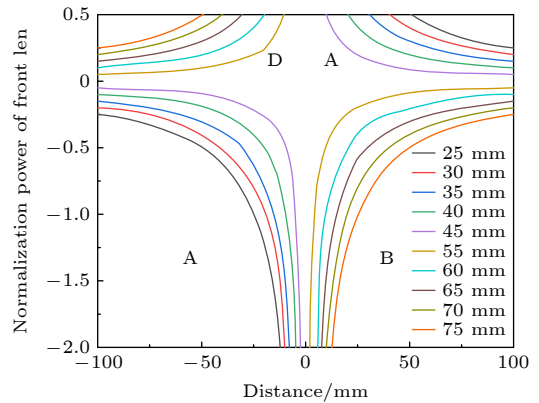


图 3 不同后焦距下前组透镜的归一化光焦度变化情况
Fig. 3. Change of normalization power of front lens under different back focal length.

从图 3 可以看出, 通过增大或减小 $|d|$ 可以抑制前组透镜归一化光焦度的变化趋势, 但是需要对 $|d|$ 进行大幅度的增减, 当 Δf_b 取值较大时, $|d|$ 的取值不再合理. 所以, 当后焦距小于焦距时, $|\phi'_{\text{front}}|$ 随着后焦距的增大呈减小趋势, 且后焦距越大趋势越明显, 如图 3 中的 A, C 区域, 此时 $\left| \frac{\omega'_{\text{front}}}{\omega'_{\text{back}}} \right|$ 变大, 应当选择无热图中相隔较远的两种材料, 如图 4(a) 所示. 当后焦距大于焦距时, $|\phi'_{\text{front}}|$ 变化情况完全相反, 如图 3 中的 B, D 区域, 此时 $\left| \frac{\omega'_{\text{front}}}{\omega'_{\text{back}}} \right|$ 变小, 应当选择无热图中相隔较近的两种材料, 如图 4(b) 所示.

3 系统仿真与实验

3.1 设计指标

本文设计的红外多光谱相机选用响应波段为 8—14 μm 的非制冷型探测器, 此探测器的像元尺寸为 17 μm , 像素为 640 \times 512, 可在 -40—+60 $^{\circ}\text{C}$ 环境下工作. 机械材料选用铝合金. 使用红外多光

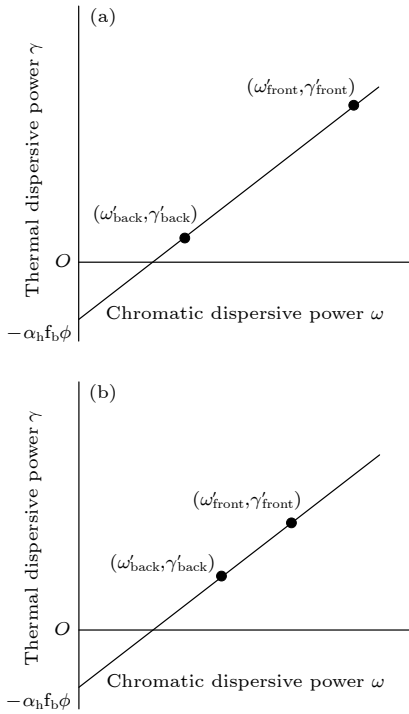


图 4 无热图中长后焦距系统材料的选择 (a) 后焦距小于焦距; (b) 后焦距大于焦距
 Fig. 4. Material selection of long back focal focus system on the athermal chart: (a) Back focal length is smaller than focal length; (b) back focal length is larger than focal length.

谱相机检测气体时, 待测目标至少需要获得 3×3 个像素. 假设需要在 100 m 远处检测到直径为 0.1 m 的气体云团, 红外多光谱相机的设计指标如表 2 所列.

表 2 光学系统指标
 Table 2. Design specifications of optical system.

Parameters	Values
Wavelength/ μm	8—14
Focal length/mm	50
FOV/ $^\circ$	15.6
F/#	1.43
Operating temperature/ $^\circ\text{C}$	-40—+60
MTF	>0.3@30 lp/mm
Depth of focus/ μm	± 44.99
Housing material ($\alpha_n = 23.6 \times 10^{-6}$)	AL
Back focal length/mm	40.53
Total length/mm	<100

3.2 设计与仿真

根据 2.2 节与 2.3 节的分析, 可以列出长后焦距红外光学系统的无热化设计流程, 如图 5 所示. 选用库克三分离物镜作为红外多光谱相机的初始

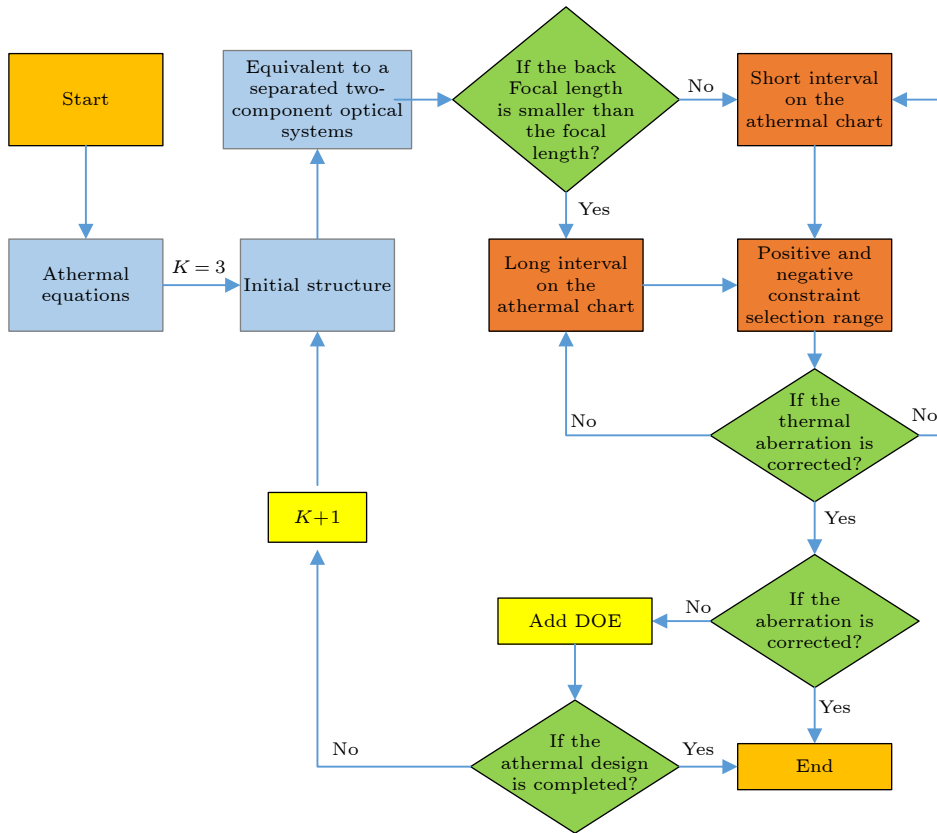


图 5 无热化设计流程图
 Fig. 5. Flow chart of athermal design.

结构, 在无热图中选择色散系数小的点 (ω'_3, γ'_3) 作为 L3 的材料, 作直线 Z_1 连接 (ω'_3, γ'_3), ($0, -\alpha_h f_b \phi$), 再以无热图中任意两点连接直线 Z_2 , Z_1 与 Z_2 的交点是等效透镜 L_{front} 的材料. 由于后焦距 f_b 略小于焦距 f' , ω'_{front} 要离 ω'_3 尽量远, 结合 2.2 节中的约束方法对材料选择范围进行约束, 选择 R'_i/ω'_i 均大于 R'_3/ω'_3 的材料, 或 R'_i/ω'_i 均小于 R'_3/ω'_3 的材料.

综上, 将 IRG204, ZnSe, IRG206 分别作为 L1, L2, L3 的材料, 如图 6(a) 所示. 由于透镜数量少, 光学系统的高级像差难以校正, 在 L1 和 L3 上各添加一个偶次非球面用来校正高级像差. 利用 Zemax 软件优化后, 在 $-40 \sim +60$ °C 范围内, 系统的热离焦均小于一倍焦深, 校正了热差. 但是无热图中的三角形面积较为扁平, 光焦度分配不够均匀, 系统依旧存在较大的轴向像差, 如图 7(a) 所示.

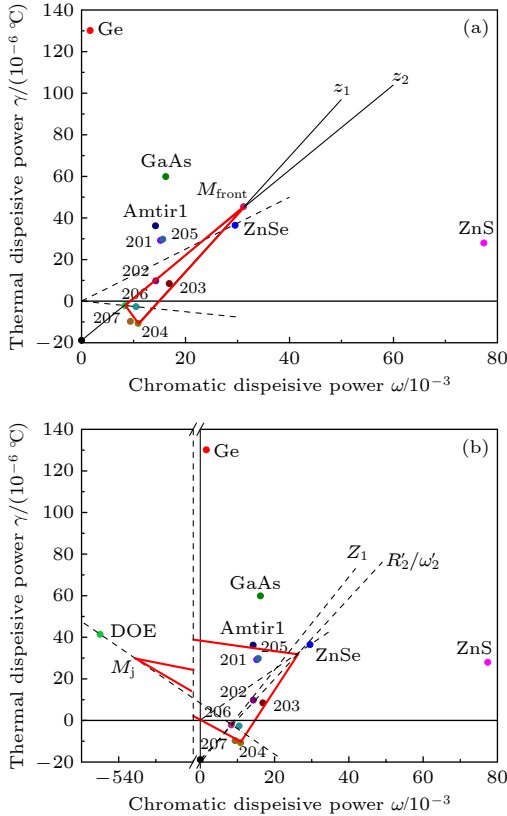


图 6 长波红外光学材料无热图 (a) 折射系统; (b) 折衍混合系统
Fig. 6. Athermal chart of long wave infrared optical materials: (a) Refraction system; (b) diffractive/refractive hybrid system.

考虑到 DOE 具有特殊的热系数及色散系数^[20]:

$$\gamma_{\text{BOE}} = 2\alpha_{\text{BOE}} + \frac{1}{n_0} \frac{dn_0}{dt}, \quad (14)$$

$$\omega_{\text{BOE}} = \frac{1}{v_{\text{BOE}}} = -\frac{\Delta\lambda}{\lambda_d}, \quad (15)$$

式中, α_{BOE} 为衍射面基底透镜材料的热膨胀系数, n_0 为环境介质的折射率, λ_d 为所选波段的中心波长. 在 L3 的偶次非球面基底上添加衍射面, 根据 (14) 式和 (15) 式求出 DOE 的热系数和色散系数分别为 $\gamma_{\text{DOE}} = 4.14 \times 10^{-5}$, $\omega_{\text{DOE}} = 0.545$. DOE 和 IRG206 等效成透镜 L_j , 等效材料 M_j 在无热图中的坐标轨迹在 DOE 和 IRG206 的连线及其延长线上, 如图 6(b) 所示, 衍射元件为前组透镜承担一部分正色差, 光焦度分配更加平滑, 在校正色差的同时也减小了轴上点球差. 添加衍射面后, 对系统再次优化, 系统的轴向像差从 0.06689 mm 减小到 0.01604 mm, 如图 7(b) 所示. 系统的热离焦由 $-12.46 \sim +10.42$ μm 减小到 $-2.52 \sim +3.86$ μm , 远小于一倍焦深, 如图 8 所示.

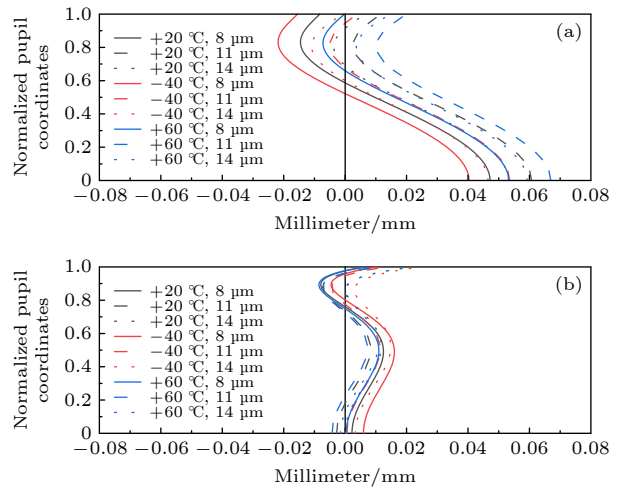


图 7 轴向像差 (a) 折射系统; (b) 折衍混合系统
Fig. 7. Axial aberration: (a) Refraction system; (b) diffractive/refractive hybrid system.

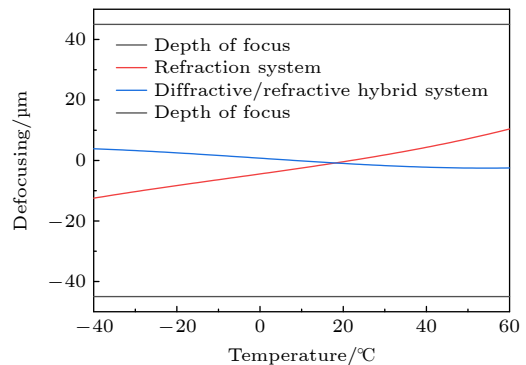


图 8 热离焦曲线
Fig. 8. Athermal defocus curve.

3.3 成像质量评价

经过无热化设计后的系统总长为 86.53 mm, 后焦距为 40.53 mm, 结构紧凑, 如图 9 所示. 对其通过调制传递函数 (modulation transfer function, MTF) 和弥散斑均方根 (root mean square, RMS) 半径来评价成像质量^[21]. 无热化后的红外多光谱相机在 -40—+60 °C 范围内, 各视场在奈奎斯特频率 (30 lp/mm) 处的 MTF 值均达到 0.39, 接近衍射极限, 如图 10 所示. RMS 半径均小于艾里斑半径 19.17 μm , 如表 3 所列. 综上, 该系统成像质量优异, 基本不受环境温度的影响.

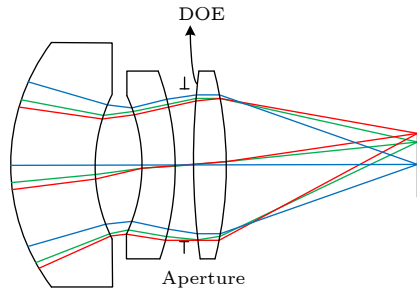


图 9 光学系统结构图

Fig. 9. Structure chart of optical system.

表 3 -40—+60 °C 范围内弥散斑均方根半径

Table 3. RMS radius in the range of -40—+60 °C.

Spot diagram / μm	Temperature/ °C		
	-40	20	60
0 field	3.779	3.166	3.137
5.6 field	5.622	5.471	5.807
7.8 field	9.039	8.755	9.033

3.4 气体成像实验

在实验室中, 采用通道为 9.43—11.53 μm 的红外多光谱相机对 SF₆ 气体进行成像实验, 选用 SF₆ 的原因是其不易燃、无毒、价格适中^[22]. 气体成像实验于 2020 年 12 月 31 日在中国安徽省合肥市的实验室中进行, 实验室的环境温度经温度计测量是 5 °C, 并于 2021 年 01 月 27 日在同一地点对仪器进行温控实验, 依旧采用 9.43—11.53 μm 的通道分别测试了仪器在 20 和 40 °C 情况下对 SF₆ 的成像结果. 两次实验结果表明, 在未采用任何图像处理的情况下, 自研的红外多光谱相机可以在大温度范围内对 SF₆ 气体清晰成像, 如图 11 所示, 光学系统性能优良, 达到测试指标.

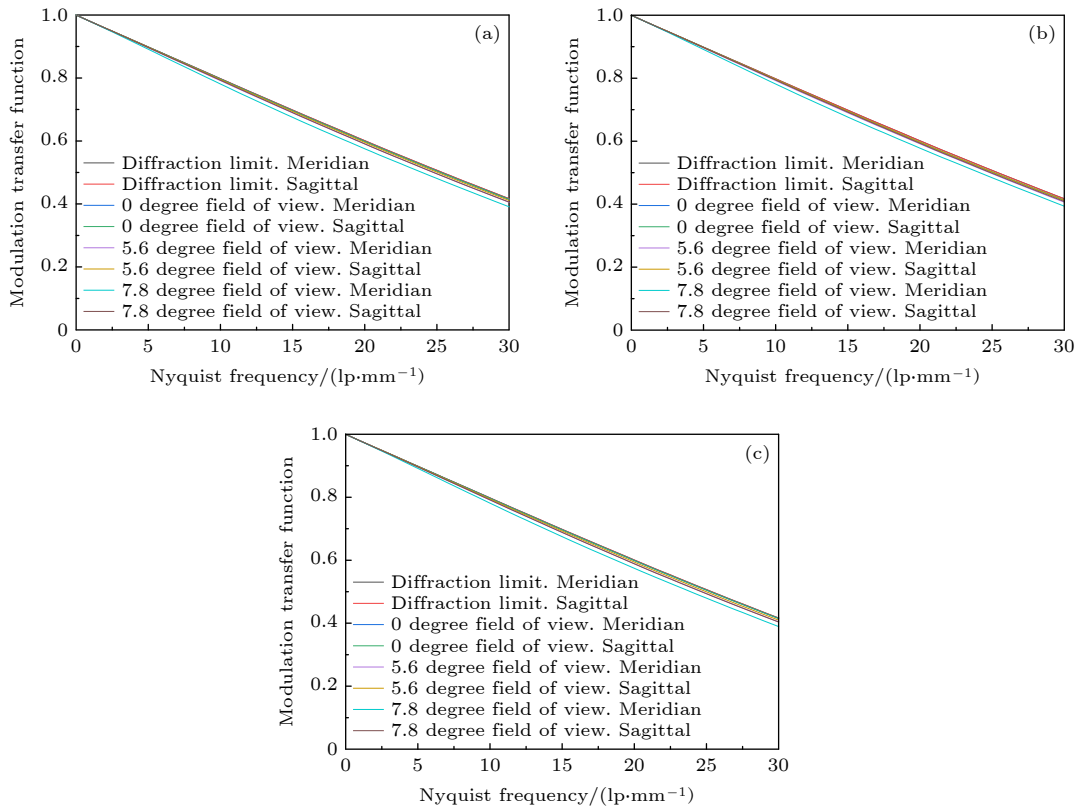


图 10 折衍射系统调制传递函数曲线图 (a) +20 °C; (b) -40 °C; (c) +60 °C

Fig. 10. MTF chart of refractive/diffractive system: (a) +20 °C; (b) -40 °C; (c) +60 °C.

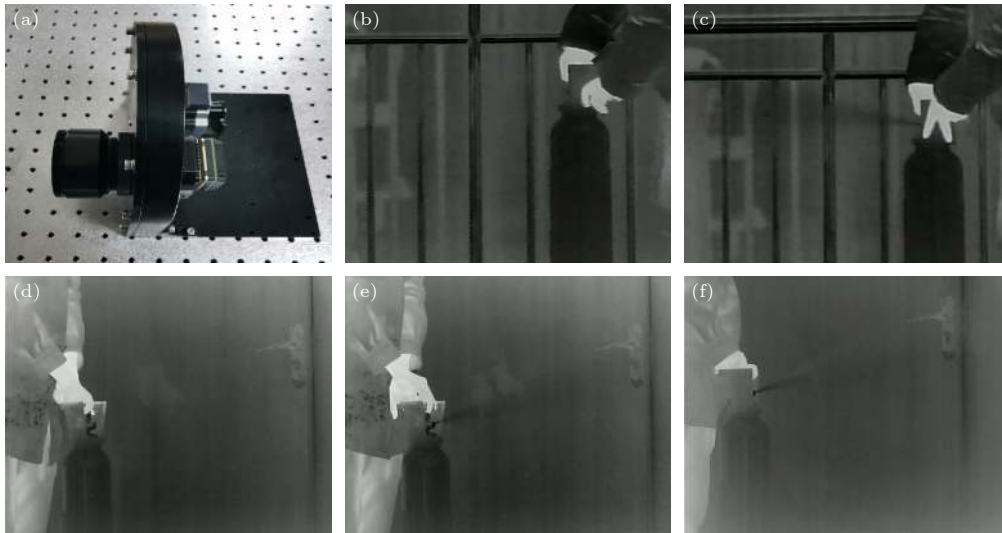


图 11 红外多光谱相机对 SF_6 气体成像 (a) 样机; (b) 2020 年 12 月 31 日实验背景; (c) 5 °C 环境下成像结果; (d) 2021 年 01 月 27 日实验背景; (e) 20 °C 环境下成像结果; (f) 40 °C 环境下成像结果

Fig. 11. SF_6 gas imaging by infrared multispectral camera: (a) Prototype; (b) background of the experiment on December 31, 2020; (c) gas imaging results in 5 °C environment; (d) background of the experiment on January 27, 2021; (e) gas imaging results in 20 °C environment; (f) gas imaging results in 40 °C environment.

4 结 论

本文建立了红外多光谱相机的无热化模型, 此模型将红外多光谱相机等效为分离式双透镜光学系统. 通过分析得出结论: 由于前后组透镜的间隔受到约束, 当后焦距小于焦距时, 前后组透镜材料在无热图中的间隔随着后焦距的增大而增大; 当后焦距大于焦距时, 前后组透镜材料在无热图中的间隔随着后焦距的增大而减小. 设计结果以及实验结果表明, 该模型极大地简化了长后焦距红外光学系统的无热化过程, 能够使红外多光谱相机在不同环境温度下工作.

参考文献

- [1] Xu L, Gao M G, Liu J G, Jiao Y, Feng M C, Tong J J, Li S 2013 *Remote Sensing of Clouds and the Atmosphere XVII; and Lidar Technologies, Techniques, and Measurements for Atmospheric Remote Sensing VIII* Edinburgh, United Kingdom, September 24–27, 2012 p85340M
- [2] Yin H, Sun Y W, Liu C, Zhang L, Lu X, Wang W, Shan C G, Hu Q H, Tian Y, Zhang C X, Su W J, Zhang H F, Palm M A, Notholt J, Liu J G 2019 *Opt. Express* **27** A1225
- [3] Yin H, Sun Y W, Liu C, Lu X, Smale D, Blumenstock T, Nagahama T, Wang W, Tian Y, Hu Q H, Shan C G, Zhang H F, Liu J G 2020 *Opt. Express* **28** 8041
- [4] Yin H, Sun Y, Song Z, Liu C, Wang W, Shan C, Zha L 2021 *Remote Sens.* **13** 791
- [5] Gay L, Alazarine A, Favier S, Blanchard S 2018 *19th Meeting of the Chemical, Biological, Radiological, Nuclear, and Explosives (CBRNE) Sensing as part of the SPIE Defense and Commercial Sensing (DCS) Symposium Orlando, United States of America, April 16–18, 2018* p106290X
- [6] Lim T Y, Kim Y S, Park S C 2017 *Curr. Opt. Photonics* **1** 378
- [7] Korai U A, Bermello A H, Strain M J, Glesk I, Velasco A V 2019 *IEEE Photonics J.* **11** 4601611
- [8] Perry J W 1943 *Proc. Phys. Soc.* **55** 0257
- [9] Tamagawa Y, Wakabayashi S, Tajime T, Hashimoto T 1994 *Appl. Opt.* **33** 8009
- [10] Tamagawa Y, Tajime T 1996 *Opt. Eng.* **35** 3001
- [11] Schwertz K, Dillon D, Sparrold S 2012 *Conference on Current Developments in Lens Design and Optical Engineering XIII* San Diego, United States of America, August 13–15, 2012 p84860E
- [12] Bernet S, Ritsch-Marte M 2017 *Opt. Express* **25** 2469
- [13] Wang L, Dou J T, Ma J, Yuan C J, Gao Z S, Wei C, Zhang T Y 2017 *Acta Phys.sin.* **66** 094201 (in Chinese) [王磊, 窦健泰, 马骏, 袁操今, 高志山, 魏聪, 张天宇 2017 物理学报 **66** 094201]
- [14] Piao M X, Cui Q F, Zhang B, Zhao C Z 2018 *Appl. Opt.* **57** 8861
- [15] Kim D C, Hermerschmidt A, Dyachenko P, Scharf T 2020 *Opt. Express* **28** 22321
- [16] Yu D Y, Tan H Y 2011 *Engineering Optics* (Vol.1) (Beijing: China Machine Press) pp31–82 (in Chinese) [郁道银, 谈恒英 2011 工程光学 (上篇) (北京: 机械工业出版社) 第31—82页]
- [17] Hu Y X, Zhou S X, Xiang L B, Yang J F 2000 *J. Opt.* **20** 1386 (in Chinese) [胡玉禧, 周绍祥, 相里斌, 杨建峰 2000 光学学报 **20** 1386]
- [18] Alaruri S D 2016 *Optik* **127** 254
- [19] Xie N, Cui Q F, Sun L, Wang J F 2019 *Appl. Opt.* **58** 635
- [20] Song Y F, Shao X P, Xu J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 6298 (in Chinese) [宋岩峰, 邵晓鹏, 徐军 2008 物理学报 **57** 6298]
- [21] Feng S, Chang J, Hu Y Y, Wu H, Liu X 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 244202 (in Chinese) [冯帅, 常军, 胡瑶瑶, 吴昊, 刘鑫 2020 物理学报 **69** 244202]
- [22] Liu Z M, Liu W Q, Gao M G, Tong J J, Zhang T S, Xu L, Wei X L 2008 *Chin. Phys. B* **17** 4184

Analysis of influence of long back focal length on athermal design based on infrared multispectral camera^{*}

Xu Huan-Yao¹⁾²⁾ Xu Liang^{1)†} Shen Xian-Chun¹⁾ Xu Han-Yang¹⁾
Sun Yong-Feng¹⁾²⁾ Liu Wen-Qing¹⁾ Liu Jian-Guo¹⁾

1) (*Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Hefei Institutes of Physical Science,
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China*)

2) (*University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

(Received 29 January 2021; revised manuscript received 29 March 2021)

Abstract

Under different ambient temperatures, the thermal aberration certainly affects the imaging quality of infrared multi-spectral camera. Therefore, an athermalized model of infrared multi-spectral cameras is established, and in this model the ambient infrared multispectral camera is equivalent to a separated dual-lens optical system. In the case of the fixed focal length, the influence of the back focal length on the change of the focal power of the front lens and back lens is analyzed. Now, the variation range of the front and rear lens interval is assumed to be restricted. When the back focal length is smaller than the focal length, the ratio of the absolute value of the focal power of the front lens to the absolute value of the focal power of the back lens decreases with the back focal length increasing. The material of the front lens and the back lens have a longer interval on the thermogram. When the back focal length is greater than the focal length, the scenario becomes exactly opposite. Combined with the judgment method of the positive value and negative value of the focal power on the thermogram, the selection range of materials is constrained by the positive value, negative value, and absolute value of focal power, thus realizing the rapid selection of the optical materials. This method is used to design an athermalized infrared multispectral camera with a waveband of 8–14 μm , a focal length of 50 mm, and an F number of 1.4 in a range from $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Through the simulation analysis, the value of the athermalized infrared multispectral camera, at the Nyquist frequency of 30 lp/mm reaches 0.39, which is close to the diffraction limit; the root mean square radius of the diffuse spot is smaller than the Airy spot radius of 19.17 μm ; the axial aberration is less than 0.02 mm, and the design results show that this method can make the long back-focus infrared optical system maintain stable imaging quality in a large temperature range. The SF_6 gas is detected experimentally, and the experimental results demonstrate the excellent optical performance of the system.

Keywords: infrared multispectral camera, long back focal length, athermal design, hybrid refractive-diffractive system

PACS: 42.15.Eq, 07.07.Df, 07.57.Ty, 42.88.+h

DOI: 10.7498/aps.70.20210217

^{*} Project supported by the National Key R&D Program of China (Grant No. 2019YFF0303400), the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 41941011), the Key Research Program of Frontier Sciences of Chinese Academy of Sciences (Grant No. QYZDY-SSW-DQC016).

[†] Corresponding author. E-mail: xuliang@aiofm.ac.cn