

文章编号:1001-5078(2026)02-0250-07

· 红外技术及应用 ·

低温高灵敏度红外多光谱相机光机辐射研究

李福东, 李洋, 傅祥博, 李滨宇, 王浩, 练敏隆

(北京空间机电研究所, 北京 100094)

摘要:针对弱目标/背景多光谱特性测量对红外成像系统灵敏度及信噪比的严苛要求, 本文提出基于低温光学技术的高灵敏度红外多光谱相机总体设计方案。构建光机背景辐射物理模型, 优化杂光抑制措施, 完成各红外波段光机辐射仿真分析仿真结果表明, 光机辐射在像面总照度为 $1.50 \times 10^{-2} \text{W/m}^2$ 至 $1.79 \times 10^{-2} \text{W/m}^2$ 之间。通过模拟真空环境下的辐射定标试验, 验证了仿真结果的准确性, 最大偏差为 2.78% (B4 谱段), 仿真结果与试验数据误差在 3% 以内, 验证了光机辐射仿真方法精度, 本文的研究为低温高灵敏度红外多光谱相机的设计与光机辐射分析提供了重要参考。

关键词: 红外; 多光谱相机; 光机辐射; 仿真分析; 辐射定标

中图分类号: V443+.5; P237 文献标识码: A DOI: 10.3969/j.issn.1001-5078.2026.02.015

Study on optical and mechanical radiation of low temperature and high sensitivity infrared multispectral camera

LI Fu-dong, LI Yang, FU Xiang-bo, LI Bin-yu, WANG Hao, LIAN Min-long

(Beijing Institute of Space Mechanics & Electricity, Beijing 100094, China)

Abstract: To address the stringent requirements for sensitivity and signal-to-noise ratio (SNR) of infrared imaging systems in weak target/background multispectral characteristic measurements, an overall design scheme for a high-sensitivity infrared multispectral camera based on cryogenic optical technology is proposed in this paper. A physical model of optomechanical background radiation is established, stray light suppression measures are optimized, and optomechanical radiation simulation analyses for each infrared band are completed. The simulation results show that the total illuminance of optomechanical radiation on the image plane ranges from $1.50 \times 10^{-2} \text{W/m}^2$ to $1.79 \times 10^{-2} \text{W/m}^2$. Through radiation calibration tests in a simulated vacuum environment, the accuracy of the simulation results is verified, with a maximum deviation of 2.78% (in the B4 spectral band). The error between the simulation results and experimental data is within 3%, confirming the precision of the optomechanical radiation simulation method. This study provides important references for the design and optomechanical radiation analysis of cryogenic high-sensitivity infrared multispectral cameras.

Keywords: infrared; multispectral camera; optical and mechanical radiation; simulation analysis; radiometric calibration

1 引言

红外光学遥感器的光机热辐射背景是制约红外系统探测灵敏度提升的关键因素。依据普朗克辐射定律, 光机结构自身会产生相应的热辐射, 造成在探

测器上叠加随环境温度波动的直流背景, 压缩探测器动态探测范围, 降低辐射测量灵敏度。随着微弱目标及弱背景探测需求攀升, 红外遥感器需具备更高信噪比与探测灵敏度, 红外多光谱探测的细分需

求更使得光机热辐射问题加剧。低温光学技术成为降低光机热辐射、实现高信噪比与灵敏度的有效途径^[1-3]。光机辐射分析能为光机结构工作温度选择及系统性能评估提供支撑,其重要性不言而喻。众多学者已开展相关研究。Masayuki H 等^[2]研究了 AKARI 低温恒温器的热设计及在轨性能;葛恒宇等^[3]探讨了基于热变形补偿的双材料低温镜头支撑结构;姜峰等^[4]对航空相机光学系统进行热设计及验证。然而,现有研究多聚焦单一方向,缺乏对低温高灵敏度红外多光谱相机光机辐射的系统性分析。

本文在现有研究基础上,结合文献[4]~[6]中的黑体辐射理论,提出了一种高精度光机辐射仿真方法,并通过实验验证了其可靠性。本文的仿真误差控制在3%以内,优于文献[7]~[9]中报道的5%~8%的误差范围,为该领域研究提供参考。

2 光机结构背景辐射理论依据

2.1 背景辐射理论

自然界中的一切物体,只要温度高于绝对温度(-273℃)都会对外辐射红外辐射。常见的红外探测系统中,光机结构的工作温度与环境温度基本相当,一般在-40℃~+50℃之间,远远高于绝对零度,因而必然会产生红外辐射。普朗克给出了黑体辐射与光谱分布规律的光谱辐射计算公式即普朗克定律,表示为:

$$M_{\lambda} = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \times \frac{1}{e^{ch/\lambda kT} - 1} \quad (1)$$

式中, M_{λ} 定义为光谱辐射出射度,单位为 $W \cdot cm^{-2} \cdot \mu m$; λ 为辐射光谱的波长,单位为 μm ; $h = 6.6256 \times 10^{-34} W \cdot s^2$, 为普朗克常数; T 为黑体温度,单位为 K; $C = 2.997925 \times 10^{10} cm \cdot s^{-1}$, 为光速; $k = 1.38054 \times 10^{-23} W \cdot s \cdot K^{-1}$, 为玻尔兹曼常数。由公式(1)可得出,黑体对外的光谱辐射出射度只与辐射波长和黑体自身温度相关^[8-9]。

2.2 典型光机结构背景辐射模型

以透射式红外光学系统为例,在红外相机成像过程中红外探测器光敏元接收到的能量主要包括两个方面,一是来自于视场内的目标及背景辐射能量,二是系统内部的光机结构内辐射及杂散背景辐射。光机结构内辐射使得在有效目标信号基础之上叠加了一个与光机结构温度高低而变化的直流背景信号,一方面会降低探测器的有效探测的动态范围,另一方面会大幅增加光子噪声,从而降低红外相机的

辐射测量灵敏度^[10-11]。

如图1所示,常见的制冷型高灵敏红外相机组成主要包括探测器、探测器杜瓦结构、滤光片、镜头结构、透镜组、遮光罩等几部分组成,其中高灵敏红外探测器一般工作在80K以下低温环境状态下,探测器杜瓦是一个真空密闭结构,用于为探测器提供低温工作环境。为了降低光机辐射的影响,杜瓦内部设计有低温冷光阑,在进行红外光学系统设计时需要保证冷光阑开口与光学系统 F 数100%匹配,有效降低视场外的光机背景辐射进入到探测器像面。冷光阑视场外的光机结构,产生的热辐射在系统内部仍会产生杂散辐射,到达探测器像面形成背景。视场内的透镜组虽然具有较高的透过率,但是透镜自身的辐射发射能量会直接到达探测器像面。光机结构杂散辐射与透镜组内辐射会大大降低红外相机的探测动态范围和辐射测量精度。因而为了降低光机结构背景辐射水平,采取低温光学设计技术,降低光机结构的工作温度成为目前重要的发展方向^[12-13]。

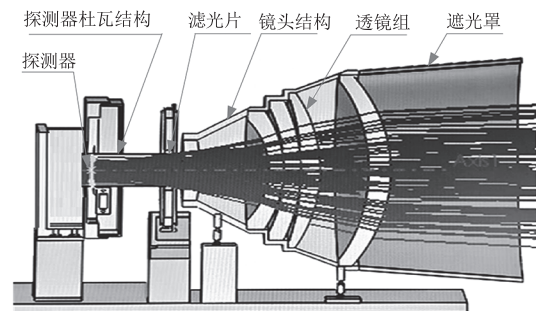


图1 光学系统等效模型示意图

Fig. 1 Schematic representation of the equivalent model of the optical system

黑体波段辐射出射度随着温度的升高逐渐升高。由于红外光机系统结构比较复杂,影响光机结构背景辐射因素很多,无法准确的计算光机结构背景辐射值,本文将通过建立仿真模型来分析计算光机结构背景辐射值,并通过实验进行验证。

3 高灵敏度红外多光谱相机建模

3.1 光学系统设计

该系统采用透射系统,通过旋转相机前端滤光片实现不同谱段的探测,滤光片倾斜5°。光学系统无实出瞳。孔径光阑位于透镜1左侧表面,透镜1左侧入光口位置为滤光片,滤光片选择硅材料,厚度6mm,距离透镜20mm。多光谱相机光学系统后截

距为 22 mm, 光路图如图 2 所示。

系统采用透射式, 通过旋转前端倾斜 5° 的硅基滤光片(厚 6 mm, 距透镜 20 mm)实现多谱段探测, 无实出瞳, 孔径光阑位于透镜 1 左侧表面, 后截距 22 mm。相机设计需求: 焦距 260 mm (@ $3.55 \mu\text{m}$), 入瞳直径 130 mm, 视场角 $9^\circ \times 9^\circ$, 工作温度 $210 \text{ K} \pm 5 \text{ K}$ 。如图 2 所示, 其能量集中度为 0.811, MTF 均值为 0.677。

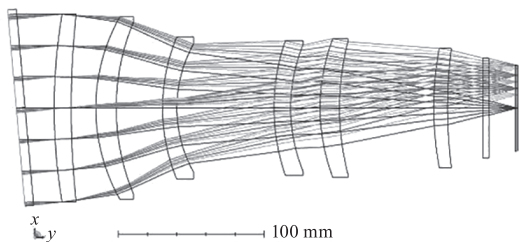


图 2 光学系统光路图

Fig. 2 Optical diagram of optical system

像元区域能量集中度与 MTF 性能良好, $15 \mu\text{m} \times 15 \mu\text{m}$ 区域能量集中度均值达 0.811 (如图 3 所示), 奈奎斯特频率 (33.3 lp/mm) 处各视场 MTF 均值为 0.677 (如图 4 所示)。

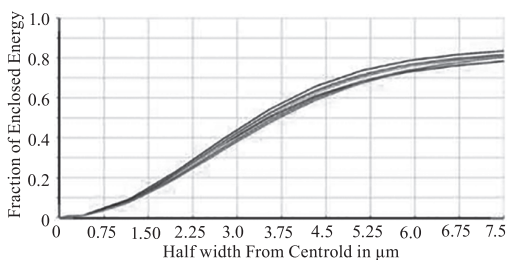


图 3 像元能量集中度曲线

Fig. 3 Curve of pixel energy concentration

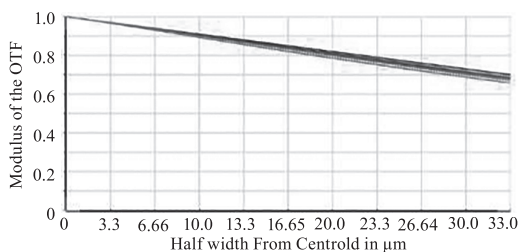


图 4 光学系统 MTF 曲线

Fig. 4 MTF curve of the optical system

3.2 低温镜头结构设计

光学系统由 6 片透镜组成, 装框后置于支撑筒。镜头常温装调、在轨低温工作, 镜片及支撑结构采用热卸载设计 (如图 5 所示), 确保低温环境下光学性能稳定。

3.3 杂散光分析建模

将 CodeV 光学设计结果导入 Light-tools, 设置元

件参数建立光学系统模型 (如图 6 所示); 简化 Pro-E 结构模型后导入, 构建杂散光分析光机结构模型 (如图 7 所示)。



图 5 光学系统 MTF 曲线

Fig. 5 MTF curve of the optical system

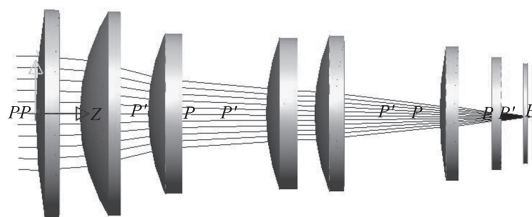


图 6 Light-tools 软件光学系统建模

Fig. 6 Modeling of optical system in the Light-tools software

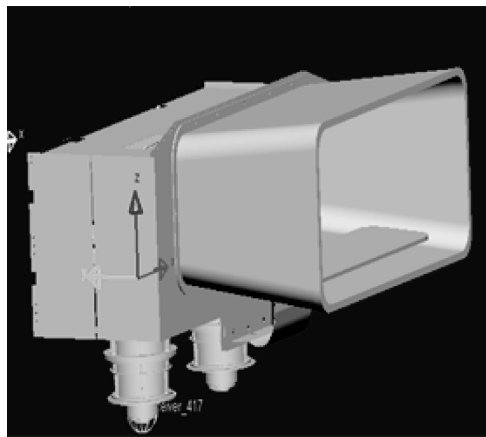


图 7 Light-tools 光机结构建模

Fig. 7 Light-tools modeling of opto-mechanical structures

经初步分析杂散光路径后, 采取以下杂光抑制优化措施, 减弱主要杂散光路径:

探测器杜瓦内表面设光阑, 如图 8 所示。透镜筒 2 与背景冷屏内壁加工消杂光螺纹, 如图 9 所示。外遮光罩喷涂高吸收率 (85%) 低散射黑漆, 如图 10 所示。杜瓦窗口前 8 mm 处设 $60 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ 光阑, 倒角并喷涂消杂光黑漆, 前后表面加工消杂散光螺纹, 如图 11 所示。

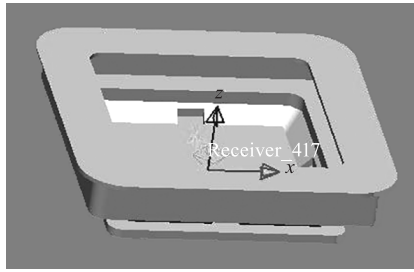


图8 杜瓦结构设计
Fig. 8 Dewar structure design

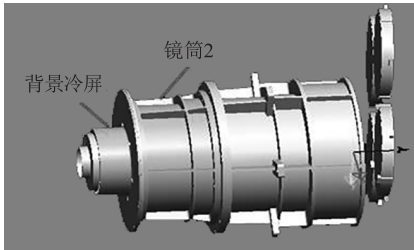


图9 透镜筒内壁设计
Fig. 9 Lens cylinder design

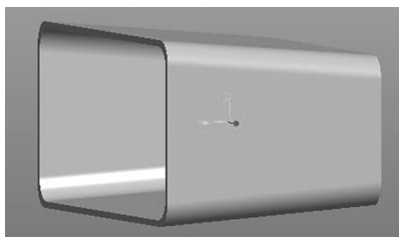


图10 外遮光罩
Fig. 10 Outer light shield

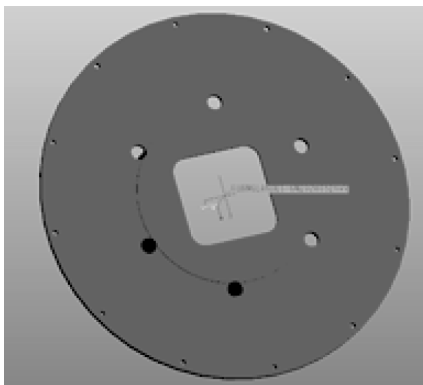


图11 光阑结构
Fig. 11 Structure of the diaphragm

3.4 表面特性参数模型

表面特性参数的精度是影响光机辐射仿真结果的关键因素,高灵敏度多光谱相机光机表面均进行了针对性表面处理,并且对吸收率、反射率、发射率和温度属性进行了实验室测试,相关测试结果如表1所示。

表1 表面特性参数

Tab. 1 Parameter of surface characteristics

Type	Absorptivity /%	Transmittance /%	Surface Reflectance/%
Surface Reflectance Bending mirror reflector	2	0	98
Filter(in-band)	1	95	4
filter(out-of-band)	1	1	98
Detector window	1	95	4
Remaining lens surface	1	98	1
optical non-luminous surface	85	-	15
Detector surface	85	-	15
Inner surface of the light shield	85	-	15
Dewar	30	-	70
Other structural surfaces	85	-	15

4 光机结构辐射仿真分析

利用 Light-tools 基于蒙特卡洛法开展辐射分析,将杂散辐射与系统构件热辐射视为独立能量束,按概率模型逆向追迹。设定像面为朗伯光源,追迹足够光线获取稳定统计结果。相机前端滤光片反射率7%,各滤光片谱段范围明确(如表2所示)。

表2 各滤光片谱段透过谱段范围

Tab. 2 The range of spectral bands transmitted by each filter band

Band	Range of spectral/ μm
B1	2.6~2.9
B2	2.7~3.0
B3	2.7~3.2
B4	4.2~4.4

计算关键表面辐射功率与探测器热辐射照度(表3),为系统设计优化提供参考。各波段光机辐射照度如表1所示,B4谱段最高($1.79 \times 10^{-2} \text{W/m}^2$)。

表3 内体辐射在像面总照度

Tab. 3 Total illuminance of internal body radiation on the image plane

Band	Optomechanical radiation on image plane($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)
B1	1.5037×10^{-2}
B2	1.5510×10^{-2}
B3	1.5715×10^{-2}
B4	1.7927×10^{-2}

5 模拟真空环境试验验证

相机采用全口径全光路辐射定标法,以标定好的黑体(辐射面 $500 \text{mm} \times 500 \text{mm}$,温度 $100 \sim 370 \text{K}$ 可调,非均匀性 $\leq \pm 0.2 \text{K}$,法向发射率 0.99 ± 0.015 ,测温精度 $\leq \pm 0.01 \text{K}$)为定标源。将黑体置于入光口,改变温度测量相机输出数字量,建立输入能量与输出信号对应关系,拟合定标方程。

多光谱相机在真空罐中开展试验,镜头控温 210 K,探测器制冷至 80 K,采集不同工况下数据,如图 12 所示。

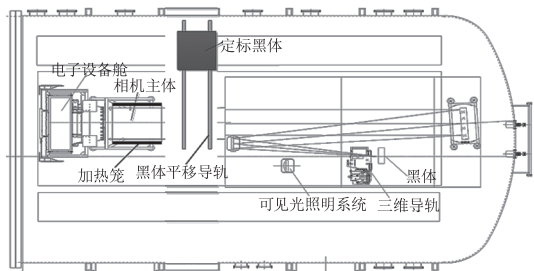


图 12 试验布局示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the test layout

相机主光学温度控制在 210 K 时,使用外部定标黑体在 150 ~ 330 K 间对相机的不同工作状态进行辐射定标,探测器制冷温度控制在 80 K,采集相机不同工作状态下的工程参数和输出信号。

6 定标数据处理

6.1 相机基本响应特性

相机在不同谱段、增益和积分时间下,对不同辐射亮度黑体成像的图像灰度均值曲线如下。不同谱段、增益与积分时间下,相机对黑体成像灰度均值曲线拟合良好,如图 13 ~ 16 所示, R^2 均高于 0.9988。

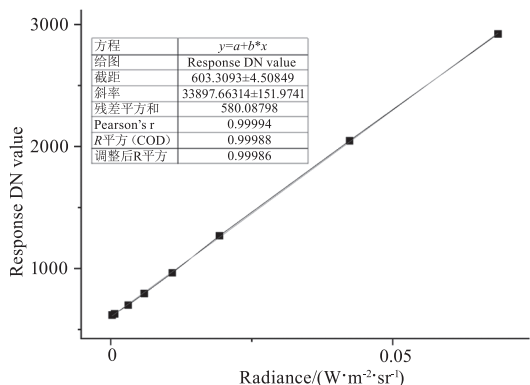


图 13 B1 谱段典型积分时间的定标曲线

Fig. 13 Calibration curves for typical integration times of band B1

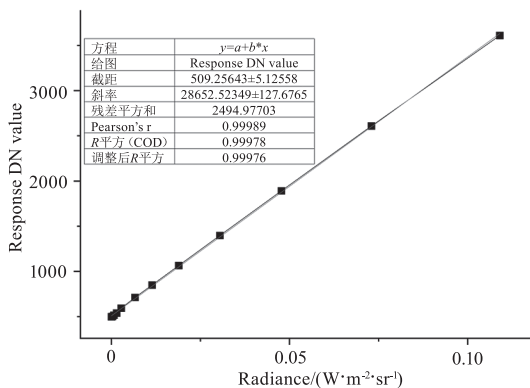


图 14 B2 谱段典型积分时间的定标曲线

Fig. 14 Calibration curves for typical integration times of band B2

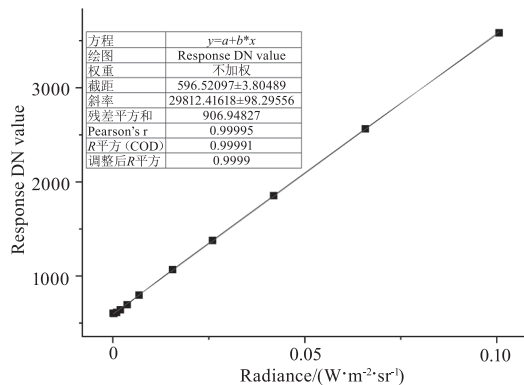


图 15 B3 谱段典型积分时间的定标曲线

Fig. 15 Calibration curves for typical integration times of band B3

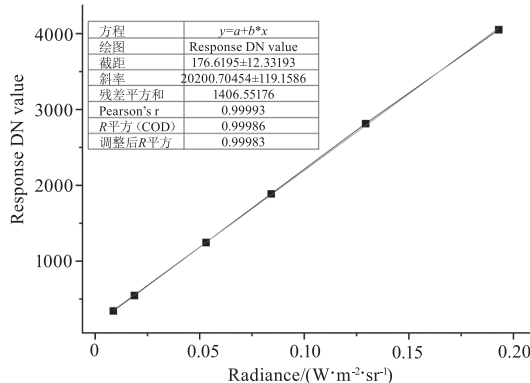


图 16 B4 谱段典型积分时间的定标曲线

Fig. 16 Calibration curves for typical integration times of band B4

6.2 辐射定标方程计算

通过处理测量相机主体定温辐射定标的相关数据能够得到每个探测元对应的定标方程。根据最小二乘法拟合得出有效 DN 值与入瞳光谱辐亮度的定标方程^[14-15]：

$$DN_c(n) = K(n)L + C(n)$$

其中, n 为探测元序号; K 为增益系数; C 为定标方程截距; L 为入瞳光谱辐亮度 ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1}$)。

针对某一特定工况,计算探测器所有探测元响应输出的平均 DN 值,然后与各测点外定标黑体入瞳等效辐亮度拟合得出的定标曲线。不同谱段、增益、积分时间下的辐射定标系数和最小二乘拟合线性度如下表 4 所示。

表 4 辐射定标系数

Tab. 4 radiometric calibration coefficients

Band	K_w	C_w
B1	33897.66	603.31
B2	28652.52	509.26
B3	29812.42	596.52
B4	20200.70	176.62

根据辐射定标方程,对多光谱相机各个波段的光机背景辐射计算,将实测光机辐射数据与仿真数据进行对比分析,通过以下步骤分离光机背景辐射与黑体辐射:

- 1) 关闭黑体源,测量系统本底信号(光机辐射);
- 2) 开启黑体源,测量总信号;
- 3) 总信号减去本底信号,得到目标辐射信号。

经最小二乘法拟合得探测元定标方程,计算各波段辐射定标系数(表4),对比实测与仿真光机辐射数据(表5),实测数据与理论分析数据偏差最大的为B4谱段,为-2.78%,详细测试结果与仿真结果对比如表5所示。最大偏差出现在B4谱段(-2.78%),验证了仿真方法的高精度。

表5 实测数据与理论数据偏差

Tab. 5 Deviation between measured data and theoretical data

Band	Radiometric calibration Irradiance on image plane ($W \cdot m^{-2}$)	Theoretical calculation of the illumination on image plane ($W \cdot m^{-2}$)	Deviation between the measured data and the theoretical data/%
B1	1.5365×10^{-2}	1.5037×10^{-2}	2.13
B2	1.5365×10^{-2}	1.5510×10^{-2}	-0.94
B3	1.5439×10^{-2}	1.5715×10^{-2}	-1.79
B4	1.7442×10^{-2}	1.7927×10^{-2}	-2.78

7 结论

本文针对低温高灵敏度红外多光谱相机,运用Light-tools分析210K下光机背景辐射,经模拟真空辐射定标试验验证。结果表明,仿真与实测数据误差 $\leq 3\%$,验证了仿真方法精度。本研究为后续同类相机设计及辐射分析提供可靠参考,未来可进一步探索更低温工况下的光机辐射特性及优化策略。

参考文献:

[1] Yin L M, Liu Y Q, Li H W. Cold optics technology to achieve high-accuracy infrared detection [J]. Infrared Technology, 2013, 35(9): 535 - 540. (in Chinese)
殷丽梅, 刘莹奇, 李洪文. 实现高精度红外探测的冷光学技术[J]. 红外技术, 2013, 35(9): 535 - 540.

[2] Wang S T, Zhang W, Wang Q. Measurement for detectivity of infrared detectors in low temperature background

[J]. Optics and Precision Engineering, 2012, 20(3): 484 - 491. (in Chinese)
王世涛, 张伟, 王强. 红外探测器件在低温背景下的探测率测试[J]. 光学精密工程, 2012, 20(3): 484 - 491.

[3] Zhi X Y, Wang D W, Tan F J, et al. Analytical method of temperature effects on space infrared optical system performance [J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(增1): 1 - 7. (in Chinese)
智喜洋, 王达伟, 谭凡教, 等. 温度对空间红外光学系统性能的影响分析方法[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(s1): 1 - 7.

[4] Jiang H Y, Wang Y K, Han G C, et al. Influence of optical-mechanical structure background radiation in MWIR camera [J]. Laser & Infrared, 2016, 46(9): 1102 - 1105. (in Chinese)
姜海勇, 王义坤, 韩贵丞, 等. 中波红外相机光机结构背景辐射影响研究[J]. 激光与红外, 2016, 46(9): 1102 - 1105.

[5] Yuan L Y, Lin Y, He Z P, et al. Design and realization of an long-wave infrared hyperspectral imaging system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2011, 40(2): 181 - 185. (in Chinese)
袁立银, 林颖, 何志平, 等. 长波红外高光谱成像系统的设计与实现[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(2): 181 - 185.

[6] Zhou S C. Advanced infrared optoelectronic engineering [M]. Beijing: Science Press, 2014: 21 - 27. (in Chinese)
周世椿. 高级红外光电工程导论[M]. 北京: 科学出版社, 2014: 21 - 27.

[7] Li M X, Wang S X, Liu Q, et al. Design and verification of the space-cold optical long-wave infrared camera [J]. Infrared, 2022, 43(7): 21 - 28. (in Chinese)
李明旭, 王书新, 刘强, 等. 空间冷光学长波红外相机的设计与验证[J]. 红外, 2022, 43(7): 21 - 28.

[8] Zhou C. Opto-mechanical design for a cryogenic IR system [J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(8): 2092 - 2096. (in Chinese)
周超. 低温红外系统光机结构设计[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(8): 2092 - 2096.

[9] Ge H Y, Xiao Z H, Wang Y. Research on cryogenic lens support structures based on a bi-material system for thermal deformation compensation [J]. Spacecraft Recovery & Remote Sensing, 2022, 43(3): 69 - 76. (in Chinese)
葛桓宇, 肖正航, 王跃. 基于热变形补偿的双材料低温镜头支撑结构研究[J]. 航天返回与遥感, 2022, 43

- (3):69-76.
- [10] Jiang F, Kong L, Bai T, et al. Thermal design and verification of the optical system of the aircraft camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2021, 42(5): 21-30. (in Chinese)
姜峰, 孔林, 柏添, 等. 航艇相机光学系统热设计及验证[J]. *航天返回与遥感*, 2021, 42(5): 21-30.
- [11] Zhu F, Zhang Y, Chen J, et al. Analysis of thermal optical properties for athermal infrared lens [J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(10): 1299-1304. (in Chinese)
朱峰, 张宇, 陈骥, 等. 消热差红外镜头热光学特性分析[J]. *激光与红外*, 2017, 47(10): 1299-1304.
- [12] Du S H, Xia X L, Sun C. Analysis on stray radiation of multi-spectral infrared remote sensor [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2008, 37(4): 763-767. (in Chinese)
杜胜华, 夏新林, 孙创. 星载多波段红外光学系统的杂散辐射分析[J]. *光子学报*, 2008, 37(4): 763-767.
- [13] Wang Y M, Zhu Q, Wang J Y, et al. Characterization of background radiation in SWIR hyperspectral imager [J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2011, 30(3): 279-283. (in Chinese)
王跃明, 祝倩, 王建宇, 等. 短波红外高光谱光机结构背景辐射特性研究[J]. *红外与毫米波学报*, 2011, 30(3): 279-283.
- [14] Zeng G H. Principles of infrared systems' NEDT and theoretical calculations [J]. *Infrared Technology*, 2012, 34(2): 63-67. (in Chinese)
曾戈虹. 红外系统噪声等效温差机理分析与实例计算[J]. *红外技术*, 2012, 34(2): 63-67.
- [15] Zou Q J, Dai R, Liu X. The noise measurement simulation of infrared imaging system [J]. *Infrared Technology*, 2008, 30(6): 346-350. (in Chinese)
邹前进, 戴睿, 刘鑫. 红外成像系统噪声测量仿真研究[J]. *红外技术*, 2008, 30(6): 346-350.