



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

博士学位论文

宽幅高分辨率红外热像仪定量化测量关键技术研究

作者姓名: 胡瑋悦

指导教师: 陈凡胜 研究员

中国科学院上海技术物理研究所

学位类别: 工学 博士

学科专业: 物理电子学

培养单位: 中国科学院上海技术物理研究所

2021 年 6 月

Research on Key Technologies of Quantitative Measurement of
Wide-range and High-resolution Thermal Infrared Imager

A dissertation submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Doctor of Engineering
in Physical Electronics

By

Hu Zhuoyue

Supervisor: Professor Chen Fansheng

Shanghai Institute of Technical Physics of the
Chinese Academy of Sciences

June 2021

摘 要

红外热像仪是 CASEarth 小卫星的载荷之一, 在 505km 轨道高度通过长线列摆扫实现 30m 分辨率和 300km 幅宽, 是我国目前在研幅宽分辨率比最大的热红外载荷。CASEarth 卫星红外热像仪发射入轨后, 将为人类活动范围、经济发展情况的探测、污染(水、土和大气污染)监测与生态功能评估、水资源和耕地普查等提供高分辨率的热红外遥感数据。

高精度的辐射定标是遥感数据量化应用的关键。红外热像仪的辐射定标精度受辐射定标模型、定标频次、仪器温度场及探测器的稳定性、黑体等定标源测量精度、仪器灵敏度等因素影响。本论文针对于摆扫式热红外载荷, 从多参数联合极值寻优设计、低频次高效定标模型、在轨高精度解算方法等三个方面开展了有针对性研究, 具体的研究内容及创新点如下:

1. 本论文针对于摆扫式相机积分时间受限的问题, 建立了响应率、仪器温度、暗电流等多参数联合优化模型, 结合工程可实现约束边界, 实现了仪器温度场、积分电容、积分时间、光学口径等参数的寻优。同时, 本论文还针对于低温出瞳与冷光阑不匹配的大视场光学系统, 建立了多组件温度网格仿真模型, 实现了仪器杂散辐射优化, 8-10.5 μm , 10.3-11.3 μm , 11.5-12.5 μm 三个波段仪器自身热辐射与 300K 黑体的信号之比分别达到了 0.214、0.204、0.563, 与 Landsat8 TIRS 的比例相当。在实现 300km 幅宽、30m 高分辨率的同时, 仪器噪声等效温差可优于 0.08K。

2. 长线列摆扫热像仪需通过卫星侧摆观测冷空实现仪器背景定量测量。本文针对于频繁定标影响仪器有效利用时间的问题, 提出了一种基于温度场的高频次背景响应预测方法, 建立了基于仪器稳定性评估的低频次高效定标模型, 实现了单轨观测一次定温黑体、两周进行一次卫星侧摆冷空观测的低频次定标。基于以上常规化的定标方案, 引入红外恒星、月球作为交叉辐射定标校验源, 可进一步在轨实现定标频次的迭代优化, 该方法在其他卫星进行了验证。

3. CASEarth 红外热像仪采用了三谱段集成滤光片、4 级 TDI 的 2000 元热红外探测器组件。针对 4 级 TDI 探测器, 提出了一种基于多温度点遍历的 4 级 TDI 像元选择方法, 三个波段的噪声等效温差可分别减小 13.14%, 7.30%, 9.36%。针对于光谱透过率、黑体温度的非均匀性等影响辐射定标精度的参数, 建立了地面测量和分析方法, 提出了低频次高效的定标解算方法, 通过地面真空低温辐射定标实验, 验证了方法的有效性, 实现了优于 0.500K 的实验室辐射定标不确定度。

关键词: 红外热像仪, 辐射定标, 长线列摆扫, 仪器自身热辐射

Abstract

The thermal infrared imager(TIRI) is the main payload of CASEarth satellite, which can achieve a resolution of 30m and a width of 300km through whisk broom with line array in the 505km orbit, and is currently the thermal infrared payload with the largest width resolution ratio in China. Once launched into orbit, CASEarth, will provide high-resolution thermal infrared remote sensing data for the detection of human activities, economic development, pollution (water, soil and air pollution) monitoring and ecological function assessment, water resources and arable land census.

High-precision radiometric calibration is the key to the quantitative application of remote sensing data. The calibration accuracy of the TIRI is affected by the radiometric calibration model, calibration frequency, instrument temperature, detector stability, measurement accuracy of calibration source such as blackbody, instrument sensitivity and other factors. This research is carried out from three aspects, multi-parameter joint extremum optimization design, low-frequency calibration model, and on-orbit high-precision solution method for the whisk broom thermal infrared load. The main contents and innovations are as follows:

1. Aiming at the problem of limited integration time of whisk broom camera, a multi-parameter joint optimization model, such as responsivity, instrument temperature and dark current, is established in this paper. Incorporate engineering constraints, and the optimization of parameters such as temperatures of instrument, integration capacitance, integration time and optical aperture are set. Besides, for the large field of view optical system where the low temperature exit pupil does not match the cold stop, a multi-component temperature grid simulation model is established to optimize the stray radiation of the instrument, so that the ratio of the instrument's internal thermal radiation to the 300K blackbody signal is less than 0.214(8-10.5 μm)、0.204(10.3-11.3 μm)、0.563(11.5-12.5 μm), which is similar to the ratio of Landsat 8 TIRS. In the realization of 300km width, 30m high resolution, the noise equivalent temperature difference of the instrument is better than 0.08K.

2. The whisk broom with long line array of TIRI needs to adjust satellite attitude to view deep space. The observation of deep space can quantitative measure background response. In view of the problem that frequent radiometric calibration affects the effective use of time of the TIRI, this paper proposes a high frequency of background response prediction method based on the temperatures of instruments and a low frequency calibration model based on instrument stability evaluation is established. The on-orbit radiometric calibration is viewing fixed temperature blackbody every scan and viewing deep space every two weeks. Besides the above normalized radiometric calibration methods, we introduce stars and the moon as calibration sources for cross-calibration, the iterative optimization of calibration frequency can be further realized in orbit. This method has been verified by other

satellites.

3. CASEarth thermal infrared imager adopts a three-band integrated filter, a four-stage TDI and 2000 pixels long line array. For the four-stage TDI detector, a four-stage TDI pixel selection method based on multi-temperature point traversal is proposed, and the noise equivalent temperature difference of the three bands can be increased by 13.14%, 7.30% and 9.36%, respectively. For spectral transmittance, non-uniformity of blackbody temperature, affected the accuracy of radiometric calibration parameters, ground measurements and analysis methods are established. We put forward the low frequency time efficient calibration calculating method, and verify the validity of the method through the ground vacuum low temperature radiometric calibration test. The laboratory radiometric calibration uncertainty is less than or equal to 0.500 K.

Key Words: Thermal infrared imager, radiometric calibration, long linear array and whisk broom, instrument self-emission

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 研究背景	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 辐射定标发展概述	2
1.2.2 热红外仪器的辐射定标方法研究现状	3
1.2.3 自身热辐射仿真与建模研究现状	13
1.3 本课题的研究内容	15
第 2 章 辐射定标方法及误差分析	17
2.1 辐射定标方法	17
2.1.1 基于黑体观测的辐射定标方法	17
2.1.2 基于月球、恒星观测的辐射定标方法	19
2.2 热像仪定标误差分析	20
2.2.1 黑体温度及发射率误差分析	20
2.2.2 系统光谱响应函数测试误差分析	21
2.2.3 探测器噪声信号分析	22
2.2.4 探测器背景响应稳定性分析	28
2.3 辐射定标精度评估方法	29
2.4 本章小结	30
第 3 章 摆扫式热像仪多温度参数联合优化设计	31
3.1 热像仪成像系统简介	31
3.1.1 低温光学系统设计方案	31
3.1.2 长线列探测器组件设计方案	33
3.2 焦平面温度对成像性能的影响	37
3.2.1 探测器组件级测试	37
3.2.2 杜瓦窗口的自身热辐射分析	38
3.2.3 暗电流与红外焦平面温度的关系研究	39
3.3 仪器杂散光仿真	42
3.3.1 仪器外部杂散光仿真	42
3.3.2 仪器内部自身热辐射仿真	45
3.4 热像仪温度场优化设计	49

3.4.1	透镜温度对背景响应的影响	49
3.4.2	扫描镜温度对背景响应的影响	50
3.4.3	多参数联合优化设计	51
3.4.4	热像仪成像性能分析	53
3.5	本章小结	54
第 4 章 热像仪低频高效辐射定标方法研究		55
4.1	实验室辐射定标	55
4.1.1	实验室定标实验设计	55
4.1.2	4 级 TDI 最佳像元组合筛选方法研究	57
4.1.3	定标数据预处理方法	59
4.1.4	相对光谱响应的非均匀性	64
4.1.5	黑体性能参数	65
4.2	实验室辐射定标	67
4.2.1	实验室辐射定标分析	67
4.2.2	辐射定标不确定度分析	69
4.3	CASEarth 卫星热像仪低频高效定标方案设计	71
4.3.1	在轨多源定标方案设计	71
4.3.2	恒星辐射定标验证	75
4.4	基于随机森林的背景响应预测方法	76
4.4.1	地球静止轨道红外相机光学系统	77
4.4.2	基于多元线性回归的背景响应建模方法	78
4.4.3	基于随机森林的在轨背景响应建模方法	82
4.4.4	实验结果及误差分析	85
4.5	本章小结	88
第 5 章 总结与展望		90
5.1	总结	90
5.2	工作展望	90
参考文献		93
致 谢		103
作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果		105

表目录

表 1.1 国内外卫星热红外传感器参数（长波波段）汇总.....	3
表 1.2 MODIS 在轨黑体的性能.....	5
表 1.3 噪声等效温差随时间的变化（B31、B32）	6
表 1.4 TIRS 系统性能要求	8
表 1.5 TIRS 的暗电流、仪器背景响应与 300K 黑体观测时的 DN 值比较	10
表 1.6 国内外热红外载荷定标相关参数.....	12
表 3.1 热像仪的设计指标.....	32
表 3.2 杜瓦窗口对应的电流.....	38
表 3.3 不同红外焦平面温度下的暗电流测试值.....	40
表 3.4 光学仿真分析中的光学元件参数.....	46
表 3.5 Tracepro 仿真仪器温度场设计	46
表 3.6 透镜温度为 185K 时，仪器背景比例随扫描镜温度的变化.....	51
表 3.7 透镜温度为 195K 时，仪器背景比例随扫描镜温度的变化.....	51
表 3.8 热像仪与 TIRS 的温度参数比较	53
表 3.9 热像仪与 Landsat8 TIRS 的仪器背景比例分析	53
表 4.1 传统方法与遍历法 TDI 后的 NEdT 比较	58
表 4.2 非均匀校正结果.....	63
表 4.3 不同光谱响应曲线的辐亮度非均匀性.....	64
表 4.4 黑体的性能参数.....	65
表 4.5 实验室定标下的辐射定标系数.....	69
表 4.6 实验室辐射定标的不确定度（K）	71
表 4.7 遥感仪器的冷背景观测方式、频次等.....	72
表 4.8 某探测器长周期响应率分析.....	73
表 4.9 部分满足热像仪观测要求的恒星.....	75
表 4.10 在轨定标观测方案设计.....	75
表 4.11 真空罐实验中主要组件温度的变化.....	78
表 4.12 拟合得到的参数值.....	79

表 4.13 不同积分时间的拟合结果.....81

表 4.14 不同算法的 10 折交叉验证结果.....86

表 4.15 训练集和测试集的平均绝对误差和方差.....86

表 4.16 多元线性回归与随机森林算法的误差比较.....88

图目录

图 1.1	MODIS 载荷结构图.....	4
图 1.2	在轨扫描镜辐亮度随扫描镜角度的变化.....	5
图 1.3	Landsat 8 TIRS 设计结构	7
图 1.4	Landsat 8 TIRS 的探测器排布	9
图 1.5	TIRS 辐射定标不确定性的主要来源.....	10
图 1.6	GEOS-R ABI 结构图	11
图 1.7	镜筒的加热位置分布.....	13
图 1.8	像面上不同像元接收到的辐射通量差异.....	14
图 2.1	发射前辐射定标误差分类.....	20
图 2.2	傅里叶红外光谱仪结构图.....	22
图 2.3	入射光通量到探测器输出数字信号的转换流程.....	23
图 2.4	背景响应变化对辐射定标的影响.....	29
图 3.1	CASEarth 卫星热像仪载荷结构	32
图 3.2	热像仪的透射式光学系统结构图.....	33
图 3.3	探测器实物图.....	34
图 3.4	红外焦平面排布。	34
图 3.5	红外焦平面模块侧视图.....	35
图 3.6	杜瓦组件结构图.....	36
图 3.7	TDI 方向示意图	36
图 3.8	探测器组件测试系统示意图.....	37
图 3.9	杜瓦内部温度分布.....	39
图 3.10	红外焦平面组件工作原理图.....	40
图 3.11	噪声随焦平面温度的变化.....	41
图 3.12	红外热像仪结构图.....	43
图 3.13	外遮光罩设计示意图.....	43
图 3.14	热像仪外部杂散光仿真模型.....	44
图 3.15	三个波段外部杂散光与 300K 目标比例与太阳离轴角的关系.....	44

图 3.16	仪器自身辐射到达探测器的光路图.....	46
图 3.17	三个波段的各组件自身热辐射占比分析.....	47
图 3.18	三个波段的各组件自身热辐射占比分析.....	48
图 3.19	背景响应随透镜温度的变化.....	50
图 3.20	热像仪的散热结构.....	52
图 4.1	定标系统结构示意图.....	56
图 4.2	定标测试的黑体温度及非均匀性.....	57
图 4.3	TDI 最佳像元组合筛选方法.....	58
图 4.4	三波段像元的噪声等效温差分布.....	59
图 4.5	探测器原始数据的预处理流程.....	60
图 4.6	单点法非均匀校正示意图.....	62
图 4.7	两点法非均匀校正示意图.....	63
图 4.8	热像仪探测器三谱段光谱响应曲线.....	65
图 4.9	面源黑体的尺寸及 6 个测温点的分布.....	66
图 4.10	黑体辐射面的温度非均匀性.....	67
图 4.11	辐亮度与探测器输出值的关系。.....	68
图 4.12	在轨辐射定标光路示意图.....	73
图 4.13	热像仪在轨线性定标系数更新流程.....	74
图 4.14	恒星定标曲线.....	76
图 4.15	相机的光学系统.....	77
图 4.16	不同组件的自身热辐射到达像面的有效立体角.....	78
图 4.17	模型拟合值和残差分布, 积分时间.....	80
图 4.18	不同积分时间下的模型残差概率分布.....	81
图 4.19	使用两种背景响应的定标误差.....	81
图 4.20	背景响应随在轨时间的变化.....	82
图 4.21	在轨组件温度随时间变化曲线.....	83
图 4.22	变量重要性排序.....	84
图 4.23	Bagging 算法图解.....	85
图 4.24	Boosting 算法图解.....	85
图 4.25	背景响应的预测误差百分比.....	87

第1章 引言

1.1 研究背景

热红外遥感仪器可为城市热岛效应监测、灾害评估、森林火灾监测、土壤水分等应用提供有效的数据。近年来,已有多颗对地观测卫星搭载了热红外遥感仪器,如 Landsat7 ETM+、Landsat 8 TIRS, Terra MODIS 等^[1-3]。

随着光学成像等技术的发展,成像卫星朝着高光谱分辨率、高空间分辨率和宽幅发展。受限于光学视场和红外探测器的规模,目前热红外遥感仪器的幅宽、分辨率比大多在 2000 左右^[4-6]。如分辨率较高的 Landsat 8 TIRS,幅宽为 185km,分辨率为 100m,幅宽分辨率比为 1850;高分五号全谱段光谱成像仪的幅宽为 60km,分辨率为 40m,幅宽分辨率比为 1500;幅宽较大的如 MODIS,分辨率为 1km,幅宽为 2330km,幅宽分辨率比为 2330:1。

针对目前热红外成像仪分辨低、幅宽窄的问题,中国科学院研制的 CASEarth 小卫星运行在轨道高度为 505km 的太阳同步轨道上,采用摆扫的成像方式实现了 30m 的空间分辨率和 300km 的幅宽,幅宽与分辨率之比高达 10000:1,可提供覆盖全球、快速更新、使用便捷的卫星遥感数据。热像仪具有 220K-340K 的大动态探测范围,220K 的低温可为极地降雪和冰雪转换的探测提供有效数据。热红外成像仪具有 300km 幅宽,在气象领域可以对城市群区域的高空云进行有效的探测。此外,宽幅宽可以有效的降低覆盖周期,缩短探测区域的覆盖时间。从应用的角度来看,30m 的分辨率高于目前我国运行的 FY3、FY4 系列气象卫星,可有效应用于极端气象天气的预报;在一些创新型应用领域,高分辨率热红外数据将创造性地解决热红外数据与现有光学高分辨率数据的有机结合难题,改善以往热红外数据使用评价单一性问题,有望为地表植被高精度健康识别、农作物病虫害监测、粮食估产等问题提供新的解决方案^[7,8]。

热红外数据的定量化应用依赖于高精度的辐射定标。随着热红外载荷数量的增加,热红外波段的辐射定标也成为近年来研究的热点之一。不同于其他摆扫遥感仪器,热像仪受限于仪器的成像方式,需要通过卫星侧摆才能观测冷空。如何提升系统的灵敏度以及在低频次定标下的定标精度是本课题关心的问题。本文将基于红外热像仪载荷开展辐射定标研究。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 辐射定标发展概述

遥感仪器的辐射定标是建立入瞳辐亮度与仪器输出计数值之间的关系,是反演物理量如地表温度等的基础^[9]。仪器的辐射定标根据实验阶段通常分为实验室定标和在轨定标。实验室定标时,黑体和冷屏是常用的定标源。一般通过改变扫描镜的角度,将扫描镜指向黑体或冷屏进行定标观测。冷屏的温度通常在 100K 以下,用于去除仪器背景,暗电流等的影响。由于在卫星运输、发射过程中,机械振动及环境等的变化,使得在轨运行时仪器的参数可能发生变化,发射前的定标系数不适用于在轨数据。在轨运行时利用星上定标源进行定标。星上黑体和冷空作为在轨主要的定标源,通过定期观测星上黑体和冷空来更新定标系数。

星上黑体经历了从像方黑体到全光路黑体、固定温度黑体到温度可调黑体的发展^[10, 11]。如风云二号气象卫星,受到卫星光学口径和重量的限制,黑体放置在后光路中,也称为内黑体。观测内黑体和冷空(地球场景时),探测器接收到的仪器自身热辐射差异来自于前光路。在使用内黑体进行辐射定标计算时,难以将前光路的自身热辐射去除,给黑体定标系数的计算带来了误差^[12, 13]。为了降低 FY-2E 卫星水汽波段的低温辐射定标误差,郭强等人提出了一种基于月球的交叉辐射定标方法,使得 FY-2E 卫星的水汽波段低温端(200-220K)的定标精度提高了 3.5K^[13-15]。在轨运行时,通过观测固定温度黑体和冷空仅能更新线性定标系数。对于定标方程为非线性方程的仪器,非线性系数和截距需要对多温度点的黑体进行观测才能更新,黑体升降温的频次、仪器温度场、探测器暗电流和响应率的稳定性等均是影响辐射定标精度的因素^[16, 17]。随着遥感技术的发展和数据定量化应用需求的提高,在轨黑体定标的频次也在不断提高,如 GOES 系列,GOES-15 卫星,红外系统每 30 分钟观测一次黑体^[18]。GOES-R (16/17) 最快可每 5 分钟观测一次黑体^[19]。

除了黑体和冷空定标源外,海洋、湖泊、沙漠等大面积且辐射特性稳定的地物目标也可作为定标源进行场地定标。多个国家均已开展了绝对辐射定标场的建设,例如非洲撒哈拉沙漠、中国的青海湖等^[5, 20-22]。场地定标的精度受到场地测量精度的影响,且测量需要耗费较大的人力、物力。近年来,交叉定标已广泛应用于各类遥感仪器。交叉定标是指建立在特定波段下探测器的输出与参考探测器相同或相似波段输出之间的关系,交叉定标对参考遥感仪器的辐射定标精度的

要求较高^[23-27]。随着在轨运行时间的增加,仪器响应和黑体的性能可能会发生衰减,仅使用黑体和冷空定标的结果难以区分衰减是由于黑体性能还是仪器性能的衰减引起的,因此在轨时还会采用外部定标源如海洋、月球、恒星等对仪器性能进行长期监测^[28-30]。作为在轨辐射定标的补充手段,交叉定标、场地定标以及辐射特性稳定的天体定标可以为传感器提供可靠、高精度的定标结果^[31-35]。

表 1.1 国内外卫星热红外传感器参数(长波波段)汇总

Table 1.1 Summary of thermal infrared sensor parameters (long wave band)

参数	TIR (ASTER)	MODIS	TIRS (Landsat8)	GF-5	HJ-1B
发射日期	1999.12	1999.12(Terra)	2013.2.11	2018.05	2008.09
轨道高度 (km)	702	702	705	705	650
幅宽 (km)	60	2330	185	60	720
地面分辨率 (km)	0.09	1	0.1	0.04	0.3
幅宽/分辨率	666.67	2330	1850	1500	2400
工作谱段	8.125~11.65	8.4-12.27	10.3~12.5	10.3~12.5	10.63~12.57
谱段数	5	4	2	2	2
NEdT (K)	0.3K@300K	0.05K@300K	0.05K@300K	/	0.42K@300K
绝对辐射精度	1K@300K	1%	1.67K@300K	1K@300K	1K@300K

1.2.2 热红外仪器的辐射定标方法研究现状

热红外遥感数据在环境质量监测、城市热岛研究、气候监测等方面发挥着重要作用,近年来对热红外波段的辐射定标研究也越来越多。下面将对 MODIS、TIRS、ABI 载荷的长波红外辐射定标方法进行具体的介绍。

(1) Terra/Aqua MODIS

Terra 和 Aqua 卫星分别于 1999 年和 2002 年发射,其上均搭载了 MODIS 载荷,共有 16 个热红外波段,波长的范围从 $3.7\mu\text{m}$ 到 $14.4\mu\text{m}$ ^[39, 43]。MODIS 的成像方式为摆扫成像,扫描宽度为 2330km,每个热红外波段有 10 个像元,其量化位数为 12 位。当 DN 值变化 1 个单位时,黑体的温度误差约为 0.01K-0.05K,且随着 DN 值的增加而减小。MODIS 由于其辐射定标精度高且性能稳定,对地观测数据已被广泛应用,且常被用来作为交叉定标的参考探测器^[26, 44-46]。

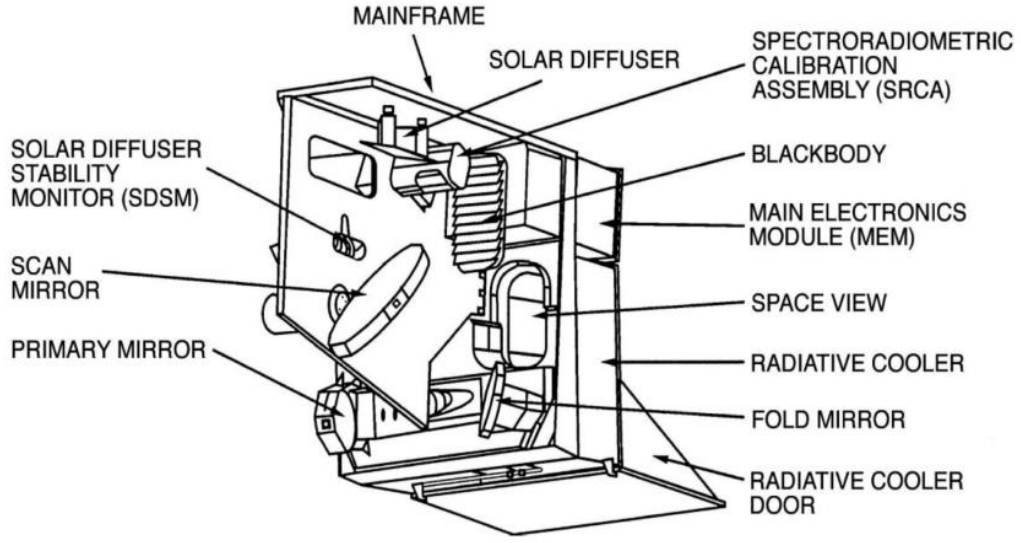
图 1.1 MODIS 载荷结构图^[47]

Figure 1.1 MODIS structure diagram

MODIS 的具体设计如图 1.1 所示，通过旋转扫描镜实现黑体、冷空和地球场景的观测。实验室定标时，将黑体温度的变化范围设为 170K 到 340K，对探测器的噪声、动态范围、非线性特性等进行测试。

MODIS 的扫描镜的自身热辐射是扫描角度的函数^[48, 49]。发射前或在轨均可对扫描镜在不同角度的响应进行测试，在轨测试结果如图 1.2 所示。观测黑体和观测冷空时的辐亮度差异由黑体辐亮度、扫描镜在观测冷空和观测黑体时的辐亮度差值和经黑体反射的仪器自身热辐射三部分组成。MODIS 的定标公式为非线性方程，如式(1.1)(1.2)所示^[47, 50]。

$$DN_{BB} = DN - DN_{SV} \quad (1.1)$$

$$\begin{aligned} RVS_{BB} \cdot \varepsilon_{BB} \cdot L_{BB} + (RVS_{SV} - RVS_{BB}) \cdot L_{SM} + RVS_{BB} \cdot (1 - \varepsilon_{BB}) \cdot \varepsilon_{CAV} \cdot L_{CAV} \\ = a_0 + a_1 DN_{BB} + a_2 DN_{BB}^2 \end{aligned} \quad (1.2)$$

为了减少时间噪声，DN 值均为 50 帧数据的平均值。 DN_{BB} 为去除背景响应后的黑体响应值。 RVS 代表了扫描镜响应与扫描角的函数， RVS_{BB} ， RVS_{SV} 分别是扫描镜在观测黑体和冷空时的扫描镜响应。 ε_{BB} ， ε_{CAV} 分别代表了黑体和扫描腔的发射率。 L_{BB} ， L_{SM} 和 L_{CAV} 分别是黑体、扫描镜和仪器自身等效的辐亮度。

MODIS 辐射定标的不确定性来源于偏移量 a_0 和非线性系数 a_2 的拟合不确定度，黑体发射率的不确定性、 RVS 的不确定性，相对光谱响应的不确定性、温度

的不确定性和探测器的噪声。MODIS 采用微扰法对辐射定标的不确定度进行评估。对于 MODIS 不同的波段，影响定标不确定度因素的排序有一定差异^[51, 52]。

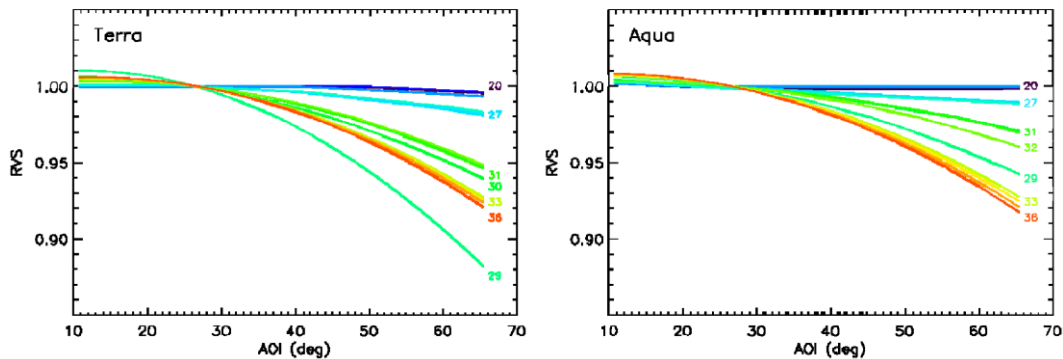


图 1.2 在轨扫描镜辐亮度随扫描镜角度的变化（左：Terra 右：Aqua）^[49]

Figure 1.2 Response versus angle from on-orbit test (left: Terra, right: Aqua)

在轨时，V 字型凹槽黑体与冷空是其主要的定标源。黑体的温度由 12 个热敏电阻测量，黑体温度最大非均匀性为 0.2K，在实际计算中，取它们的平均值作为黑体温度进行辐亮度的计算以减少随机误差。MODIS 的在轨定标方案为每次扫描后观测黑体和冷空，黑体温度通常固定在 290K（Terra MODIS）或者 285K（Aqua MODIS）。对冷空和单个温度点黑体的观测数据只能对线性定标系数更新，即 b_1 。为了更新辐射定标的偏移量 a_0 和非线性系数 a_2 ，黑体以固定周期（约为每年 4 次）进行升降温定标，非线性系数的更新频次较低。此外，受到星上黑体功率、黑体升降温时间等的限制，星上黑体的温度范围小于发射前定标的变温范围，为 270K-315K^[39]。

表 1.2 MODIS 在轨黑体的性能

Table 1.2 The performance of MODIS on-orbit blackbody

卫星/仪器	可变温度范围	在轨黑体温度	黑体温度不确定度
Terra MODIS	270K-315K	290K	10mK@290K
Aqua MODIS	270K-315K	285K	5mK@285K

MODIS 除了采用黑体进行辐射定标外，还采用月球作为定标源对热红外辐射波段进行定标^[53]。波段 21 的设计观测最大温度为 335K，波段 31 的实际饱和温度为 392K，两个波段均可对月球观测。探测器采集到的月球辐亮度包括月球的辐射和月球表面的太阳反射，定标波段内月球的发射率和反射率是计算月球辐亮度的重要参数^[54]。

MODIS 热红外波段对月定标的具体步骤如下：

(1) 采用波段 31 的对月观测数据及定标系数解算月球温度。其中，月球的发射率为 0.9，忽略反射。

(2) 结合两个波段的黑体辐亮度曲线拟合获得波段 21 的月球的发射率和反射率。

(3) 带入波段 21 的线性定标公式求解定标系数。

除了利用月球观测数据对辐射定标系数求解外，还可对 MTF、探测器长周期响应变化、像元串扰等进行解算^[55, 56]。

随着在轨运行时间的增加，还需要对探测器性能的稳定性进行评估。MODIS 的在轨噪声和响应性能十分稳定。表中列出了 2000 年到 2014 年的 B31、B32(10.78-11.28 μm , 11.77-12.27 μm)两个波段的噪声等效温差。仅 2002 年 B31 的噪声等效温差减小了 0.01K，其他年份的仍保持在发射前的水平^[51, 57]。

表 1.3 噪声等效温差随时间的变化 (B31、B32)

Table 1.3 Change of noise equivalent temperature difference with time (B31, B32)

Band	2000	2002	2004	2006	2008	2010	2012	2014
10.78-11.28	0.03	0.02	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03
11.77-12.27	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04

焦平面温度及其稳定性是探测器响应稳定性的重要保障。在轨时，MODIS 的焦平面的温度设计值为 83K。从 2006 年开始，Aqua MODIS 焦平面的温度开始随着季节和轨道发生波动，并且波动范围逐年增加。探测器的增益随焦平面温度的变化而变化。在 2012 年，焦平面温度波动可达 0.65K，对于波段 31-36，探测器的增益系数变化可达 6%。由于线性系数在每轨扫描后都会更新，因此短时间内焦平面温度的波动可以忽略，对线性系数的影响也很小。对于非线性系数，焦平面温度的波动对亮温的影响小于 0.3K^[58, 59]。

黑体升降温需要约两天的时间，其中黑体升温过程大约为 15h，降温的过程约为 24h^[6]。在黑体升降温的时间内，由于焦平面温度无法控制在固定温度，定标的线性系数的波动可达 4%。在轨利用多个黑体温度的数据拟合定标线性系数时，需要首先建立线性系数与焦平面温度的关系^[58, 59]。因此，在轨焦平面温度的稳定性是实现高精度定标的重要保障。

(2) Landsat8 TIRS/ Landsat 9 TIRS2

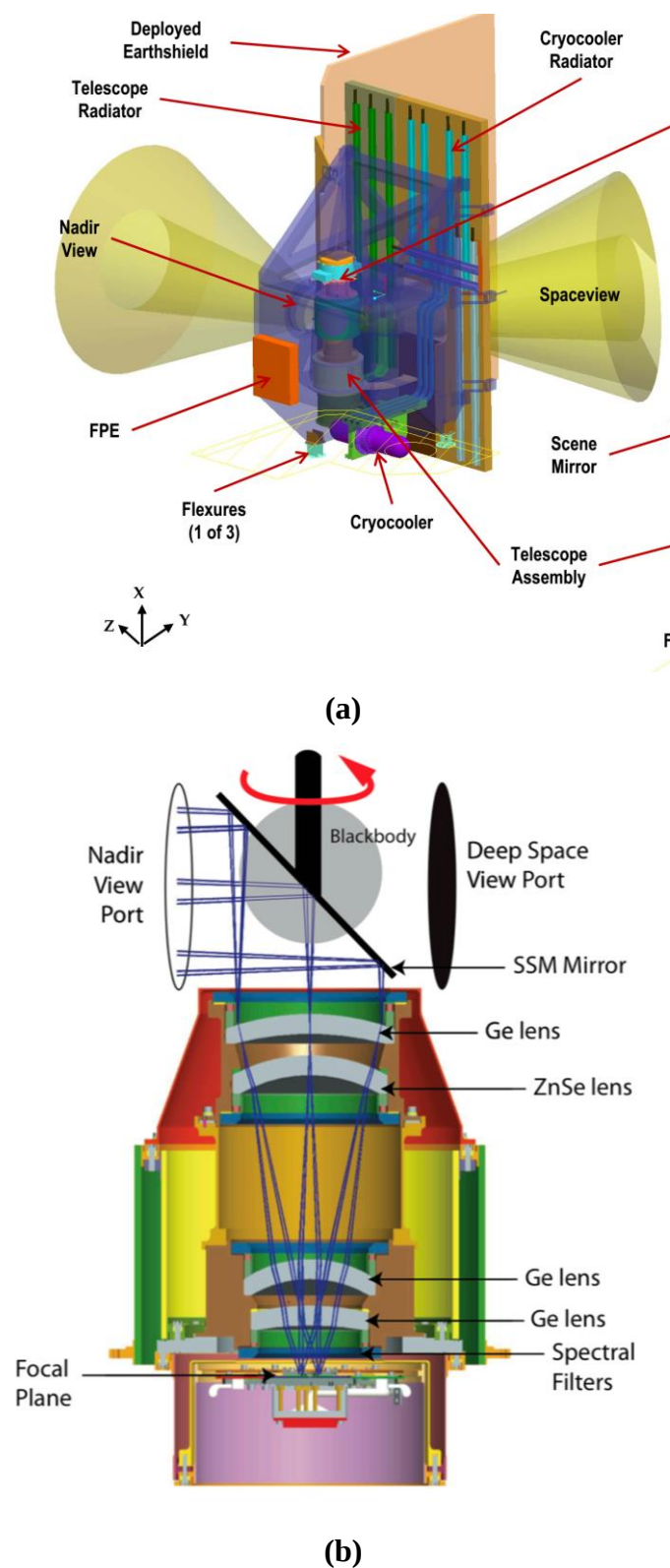


图 1.3 Landsat 8 TIRS 设计结构^[32] TIRS 的整体设计(b)TIRS 光学系统的设计

Figure 1.3 Landsat 8 TIRS design structure (a) The overall design of TIRS (b) Design of TIRS optical system

表 1.4 TIRS 系统性能要求

Table 1.4 TIRS system requirements parameters

参数	数值
光学系统的 F 数	1.64
焦距	178mm
黑体发射率	0.992
温度稳定性	
焦平面	0.05K
光学系统	0.1K
黑体	0.1K (270K-330K)
像元尺寸	25 μ m $\times$ 25 μ m
像元数量	1850
动态范围	240K-360K
光电增益	0.3
暗电流	8 $\times 10^7$ e-/s
读出噪声	260e-
总的噪声	2.28 $\times 10^8$ e-
300K 的光电流	4.916 $\times 10^8$ ph

Landsat8 共搭载两个成像仪器：陆地成像仪 OLI(Operational Land Imager)，热红外传感器 TIRS(Thermal Infrared Sensor)。TIRS 载荷共有两个热红外谱段，分别为 10.3~11.3 μ m(B10)和 11.5~12.5 μ m(B11)，采用推扫方式成像，幅宽为 185km，其星下点地面分辨率设计值为 100m。TIRS 的光学系统由四个折射透镜组成，焦距为 178mm，F 数为 1.64^[60, 61]。相机的系统设计如图 1.3(b)所示。

TIRS 的焦平面探测器为量子阱探测器，由 3 块 640 $\times$ 512 的 SCA 拼接而成。两个模块间重叠 27 个像元，拼接后共有 1850 列像元，单个像元尺寸为 25 μ m $\times$ 25 μ m。除了 B10 和 B11 两个成像波段外，在两个波段间还设置了可以测量暗电流的暗波段（dark band）。在轨对暗电流的测量可减小暗电流变化对定标精度的影响^[61-64]。TIRS 焦平面的排布如图 1.4 所示。

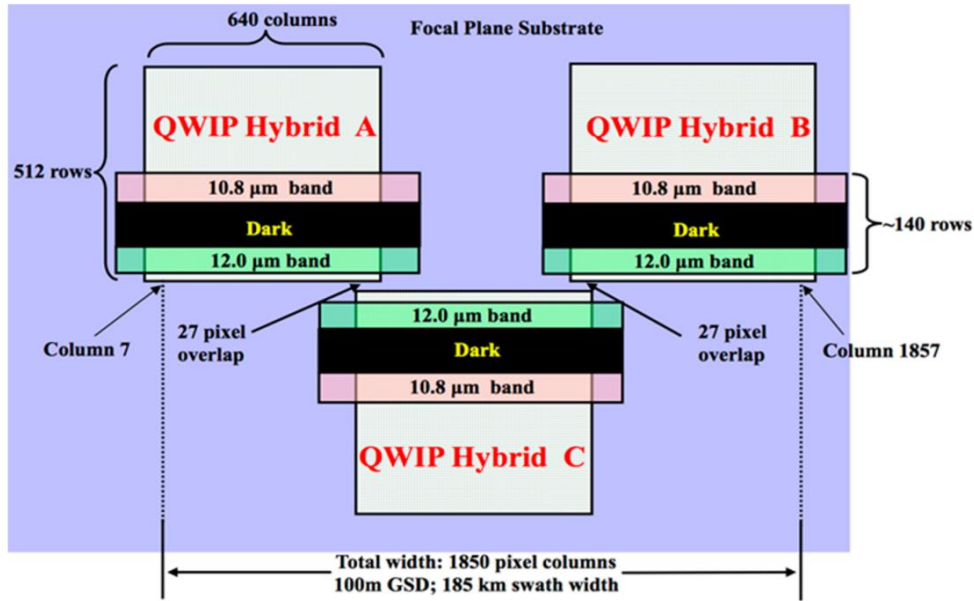
图 1.4 Landsat 8 TIRS 的探测器排布^[61]

Figure 1.4 Landsat 8 TIRS detector arrangement

从探测器的设计来看，TIRS 探测器电子数到 DN 值的转换关系是非线性的；在电子数为满井电荷的 0%-15% 内，DN 值与电子数的转换斜率大约是电子数在满井电荷 15%-100% 的 4 倍^[61]。因此，辐射定标的第一个步骤是对 DN 值进行分段的线性化。利用线性化后的 DN 值，建立辐亮度与 DN 值之间的线性关系，定标公式如下：

$$L = M * Q_{cal} + A \quad (1.3)$$

$$T = \frac{k_2}{\ln(\frac{k_1}{L} + 1)} \quad (1.4)$$

L 为辐亮度， Q_{cal} 为探测器输出 DN 值，M 为增益系数，A 为偏置。M、A 以及 Landsat 8 图像均可从 NASA 网站找到。根据公式(1.3)和公式(1.4)可将图像采集的 DN 值转换为温度。Landsat 9 TIRS2 对 DN 值线性化后，采用非线性定标公式进行定标^[66]。

在热红外波段，暗电流和仪器背景响应的大小是目标成像动态范围、辐射分辨率的重要限制因素。我们根据 Landsat 8 TIRS 的探测器设计数据、背景响应数据及定标参数对 300K 的黑体响应输出推算，并计算比例关系^[65]。

表 1.5 TIRS 的暗电流、仪器背景响应与 300K 黑体观测时的 DN 值比较

Table 1.5 Comparison of TIRS dark current, instrument background response

	暗电 流 DN 值	300K 黑 体 的 DN 值	仪器背景响 应 DN 值	暗电流与 300K 黑 体的比例	仪器背景与 300K 黑体的比例
B10	346	1775.62	628.50	0.19	0.20
B11	346	1652.32	1077.70	0.21	0.53

发射前的辐射定标实验除了拟合得到辐射定标系数外,还需要分析辐射定标的不确定度是否满足要求。结合辐射定标公式和系统结构来看,定标的不确定度主要来源于背景辐射、反射镜的反射率、OAP(离轴抛物面)的反射率、黑体定标源、杂散光、扫描镜反射率的不确定度等。星上黑体作为仪器的主要定标源,其性能对定标结果有着重要影响。TIRS 的黑体是一个 V 字形凹槽的曲面黑体^[67],发射率为 0.992;黑体温度的不稳定性为 0.1K。在定标过程中,黑体定标源引入的不确定度小于 1%。总的来看,在黑体温度为 260K-320K 时,TIRS 总的定标精度满足小于 2%的要求。

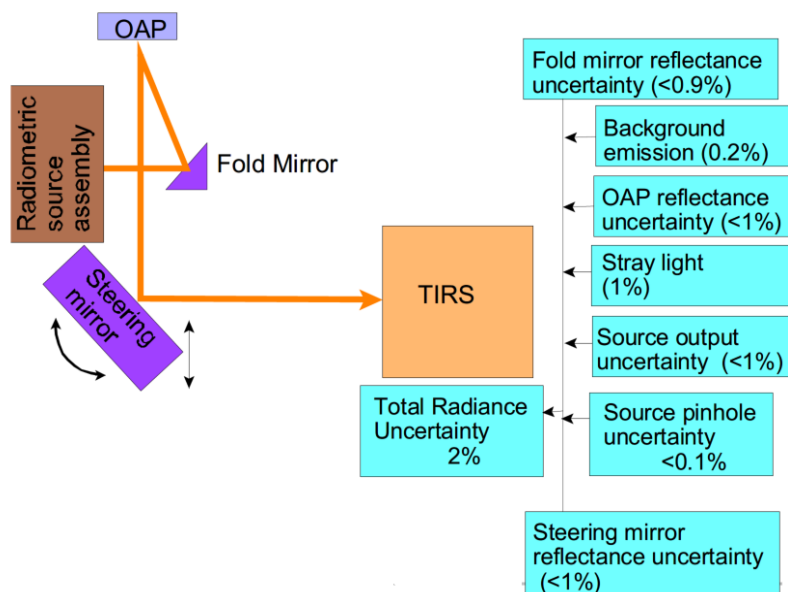
图 1.5 TIRS 辐射定标不确定性的主要来源^[68]

Figure 1.5 The main source of uncertainty in TIRS radiometric calibration

Landsat 8 TIRS 在轨时定标方案为每次观测地球场景前后,旋转扫描镜对黑体和冷空各观测 60s 更新定标系数。两次定标观测的间隔约为 40 分钟。通过对月球观测和场地观测等可以对杂散光进行评估。Landsat8 在轨运行时发现了严

重的杂散光问题，图像上有带状伪影且辐射定标误差增大，影响了遥感数据的定量化应用^[69, 70]。为了减小 Landsat 8 TIRS 杂散光对成像的影响，Aaron Gerace 利用 MODIS 的数据对杂散光估计并修正。杂散光修正后，带状伪影减少且辐射定标精度小于 0.5%，满足 2% 的定标要求^[2, 32, 71-73]。此外，基于 Landsat 8 TIRS 在轨受到杂散光影响的经验，在 Landsat 9 TIR-2 的光学系统设计时，采取了增加挡光环等杂散光抑制方案来减小杂散光的影响^[74, 75]。

(3) GEOS-R ABI

美国分别于 2016 年和 2018 年发射了 GOES-R 系列的 GOES-16 和 GOES-17 两颗卫星，其上搭载了 ABI (Advanced Baseline Imager) 成像仪^[76, 77]。ABI 共有 10 个热红外波段，中心波长范围从 $3.9\mu\text{m}$ 到 $13.3\mu\text{m}$ ，采用摆扫的方式进行成像。星上黑体和冷空作为 ABI 的定标源进行在轨定标^[78]。黑体和冷空的观测时间间隔由观测模式决定，每 5 分钟或者 15 分钟对黑体观测一次；每次扫描后进行一次冷空观测以更新背景响应。

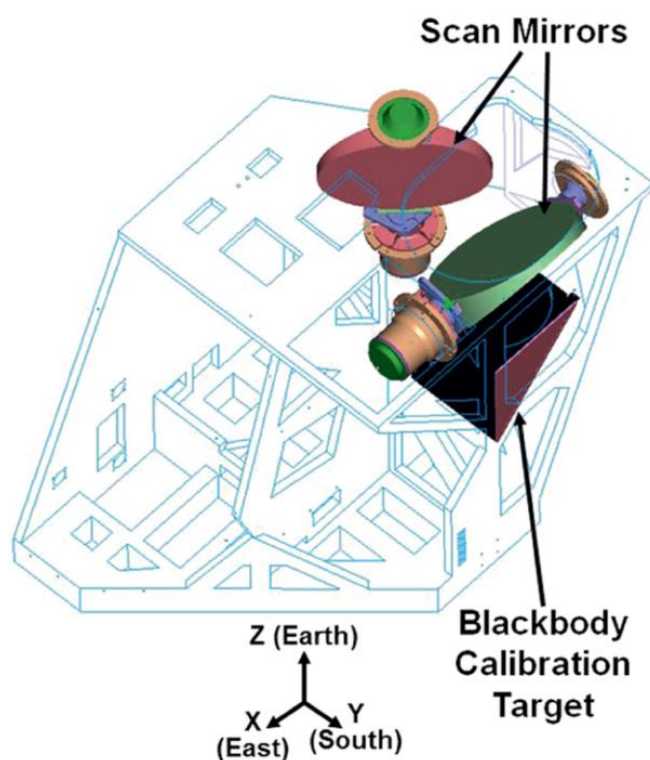


图 1.6 GEOS-R ABI 结构图^[78]

Figure 1.6 GEOS-R ABI structure diagram

ABI 共有两个独立的扫描镜，分别记为东西和南北扫描镜^[80]。扫描镜指向不同角度时，其自身热辐射也不同。因此，在定标公式中加入了由于扫描镜角度差

异引入的辐亮度误差。ABI 的定标公式为非线性公式，如式(1.5)所示。

$$L_{BB} = m\Delta C_{BB} + q\Delta C_{BB}^2 - (L_{EW@BB} + L_{NS@BB}) + (L_{EW@SL} + L_{NS@SL}) \quad (1.5)$$

m 为线性系数，观测黑体和冷空后进行更新； q 为非线性系数，由发射前的实验室定标数据计算得到； L_{BB} 是黑体对应的辐亮度， $L_{EW@BB}$ ， $L_{NS@BB}$ 分别是对黑体观测时东西扫描镜和南北扫描镜自身辐射的辐亮度， ΔC_{BB} 是观测黑体时的探测器响应值减去对冷空观测的探测器响应值^[19, 81]。与 MODIS 类似，在轨定标时每次观测黑体和冷空后更新线性定标系数^[19, 79]。

红外探测器的性能如噪声、暗电流、动态范围等均会受到焦平面温度的影响。GEOS-17 发射前，红外焦平面的工作温度设置为 60K。发射后，由于制冷系统出现故障，红外探测器焦平面温度升高，图像噪声增加；且在夜间的某些时段，由于焦平面温度过高，某些波段图像会出现饱和现象。为了提高 GEOS-17 热红外波段的成像性能和定标精度，进行了定标方案、算法等的改进。如定标时，对焦平面温度稳定和不稳定的情况分别采用两种不同的增益模式；提高定标频率，每五分钟进行一次黑体定标；更新定标查找表 LUTs (calibration look-up tables) 和最佳探测器选择表 (BDS) 等。此外，焦平面温度的升高也会导致某些谱段在轨的光谱响应函数与发射前测试的光谱响应函数不同，引入亮温误差^[82]。

表 1.6 中列出了热红外载荷的光学系统设计方案、成像方式以及定标相关的参数^[36-42]。

表 1.6 国内外热红外载荷定标相关参数

Table 1.6 Related parameters of thermal infrared load calibration at home and abroad

仪器	GOES-R /ABI	Himawari-8/AHI	MTG/FCI	Landsat 8/TIRS	Terra/MODIS
光学系统	离轴四镜	离轴四镜	三反镜	离轴四镜	离轴两反
工作方式	摆扫	摆扫	摆扫	推扫	摆扫
定标公式	二次方程	线性方程	/	线性方程	二次方程
定标间隔	5/15 分钟	10 分钟	10 分钟	约 40 分钟	每次扫描

目前，已发射的高精度热红外载荷的在轨定标频次较高，尤其是摆扫成像的遥感仪器，定标频次可达每 10 分钟一次。基于高频次的辐射定标可大大减小由于仪器温度场的不稳定性、探测器响应随时间衰减带来的定标误差，如何减小这些因素对定标的影响低频次定标遥感仪器中需要研究的问题。

1.2.3 自身热辐射仿真与建模研究现状

在热红外波段，仪器自身热辐射不可忽略，且其大小是限制仪器灵敏度的一个重要因素^[83]。抑制仪器自身热辐射的方法可分为两种，优化光机设计和合理设计仪器的温度场^[84-86]。

在光学系统设计阶段，通常采用光学仿真软件如 ASAP、FRED 等对仪器自身热辐射进行仿真，光学透镜、机械结构的反射率、发射率和吸收均是影响仿真精度的重要参数^[87, 88]。国内外已有多个机构对不同遥感仪器的杂散光抑制提出优化方案，并通过仿真验证其有效性。Xiuwen Yao 等人对典型红外光学系统建立了杂散光的仿真模型，分析了系统内各部分的杂散光的占比及杂散光在像面的非均匀性。对提出的抑制杂散光的方法进行了验证，结果表明，该方法大大降低了杂散光且不会对像面的非均匀性产生影响^[89]。

A.V. Pravdivtsev 等人利用非序列光线追迹方法，考虑了多衍射阶的能量散射，对内部杂散辐射进行建模并对不同光学元件的辐射能量在总的内部杂散辐射中的占比进行分析。在镜筒设置 4 个加热点 A、B、C、D，如图 1.7 所示。

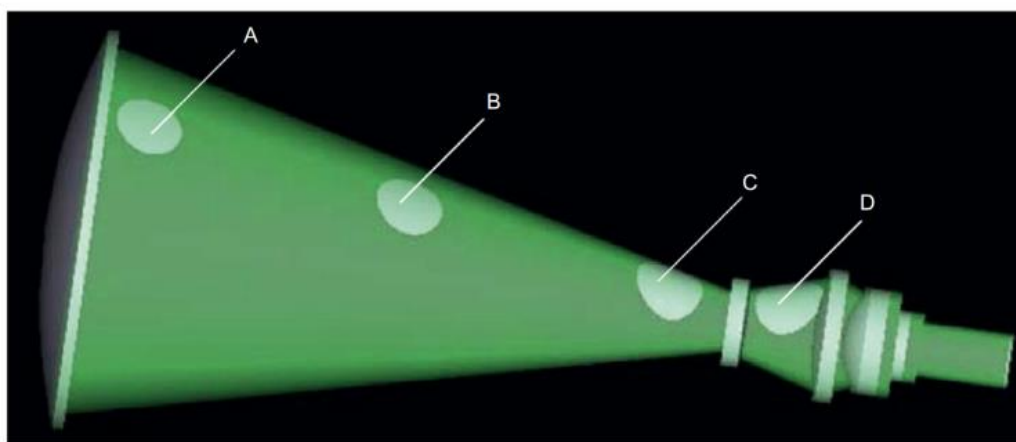


图 1.7 镜筒的加热位置分布

Figure 1.7 The heating position distribution of the lens barrel

当镜筒温度发生变化时，其温度在镜筒的空间分布是不均匀的；靠近探测器的镜筒部分产生的自身辐射能量更大，D 部分产生的能量约为 A 部分产生的能量的 240 倍；自身热辐射在像面上的分布是非均匀的。因此，在仪器设计时和使用时，应尽量保持镜筒温度稳定，减小仪器背景辐射的波动^[90]。

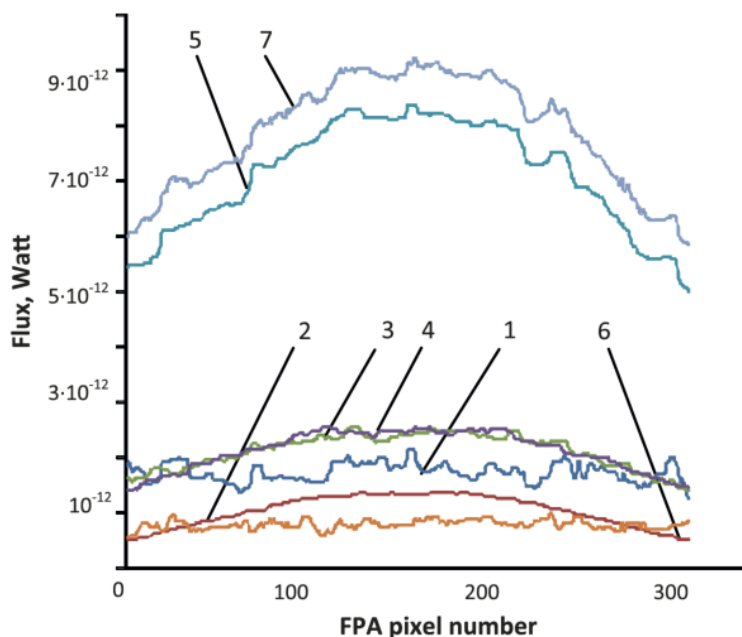


图 1.8 像面上不同像元接收到的辐射通量差异

Figure 1.8 The difference in radiant flux received by different pixels on the image plane

Jessica R. Zheng 等人对 KISS 系统的自身热辐射进行了分析。利用 FRED 软件计算光学元件和机械机构对应的立体角，并根据各元件的温度、发射率计算各元件的自身热辐射及各元件自身热辐射的占比。根据仪器的自身热辐射结果来看，可以对光学元件等温度进行优化使得仪器背景辐射最小。仪器背景响应是影响仪器的灵敏度的重要因素，还对在不同环境温度下的仪器自身热辐射进行了仿真。环境温度为 200K 时和环境温度为 240K 的灵敏度的差大于 $2^{[91]}$ 。

李岩等人对红外系统中镜筒的发射率与自身热辐射的关系进行了仿真，镜筒内壁的发射率减小使得反射增强，且总的自身热辐射和外部杂散光的 PST 增大。因此，为了降低镜筒的自身热辐射，镜筒内的发射率取 0.85^[92]。

长春光机所的朱杨对不同发射率的红外材料的仪器自身热辐射大小进行了分析，并在光学系统设计时对内遮光罩与视场光阑等结构进行优化设计，抑制了仪器的自身热辐射。最终的设计结果表明，在总的自身热辐射中，光学元件的占比约为 32.6%，杂散辐射等效于 203K 黑体的辐射^[93, 94]。

除了在仪器设计阶段对仪器内部的杂散辐射进行仿真分析外，还需要对系统自身热辐射进行测试来验证仿真结果。仪器自身热辐射的稳定性是影响定标精度的因素之一。针对不能频繁测量背景响应或背景响应的仪器，通过建立组件/环境温度与背景响应的关系，可对背景响应及时更新，提升定标精度。

长光所的田棋杰等人对红外经纬仪的内部杂散辐射进行了仿真分析和实际测量。为了抑制内部杂散辐射,设计了球面发射温阑,相比于平面发射温阑,其自身热辐射降低了十分之一。采用球面发射温阑的设计可以提升仪器的动态范围。红外经纬仪的自身热辐射受到环境温度的影响,且红外经纬仪工作在外场,温度变化范围大,必须及时对仪器自身热辐射进行更新以降低环境温度对定标精度的影响。因此,提出了基于积分时间和环境温度的仪器自身热辐射的模型,即利用两个不同环境温度时计算不同积分时间的仪器杂散辐射。实验结果表明,环境温度从 0℃ 上升至 50℃ 时,温度漂移引入的最大误差为 10.28%,利用自身热模型对温度漂移进行补偿后,温度漂移引入的最大误差仅为 1.04%。该方法可降低由于环境温度变化导致的定标误差^[95-98]。

对于 MetOp/HIRS,仪器自身热辐射占信号的比例约为 98%,自身热辐射的变化对定标截距产生最大约 1% 的影响。如果不及时对背景响应数据更新,对亮温为 285K 的地物目标,自身热辐射的变化最大可产生 1K 的定标误差。Tiejun Chang 等人提出了一种简化模型,即建立滤光轮和主镜自身热辐射变化与背景响应变化的二元线性关系(短波和长波),分析仪器自身热辐射与仪器温度的关系,并应用在 HIRS 的在轨定标中^[99-102]。

目前,国内外已有多个机构对仪器自身热辐射进行了仿真研究,为高灵敏度的仪器优化设计提供了基础。仪器自身热辐射对仪器温度十分敏感,对于仅能低频次观测冷空的遥感仪器来说,仪器自身热辐射与温度的建模尤为重要。不同的红外探测系统模型中温度自变量的选取由于内部设计结构差异的而不同。此外,在对自身热辐射与温度建模时未考虑探测器响应等随时间变化,仅对单日的在轨数据进行建模,难以应用在低频次的冷空观测在轨辐射定标中。

1.3 本课题的研究内容

热像仪观测冷空需要卫星侧摆才能实现,在轨的低频次的定标给高精度的辐射定标带来了难题。本论文以热像仪的高精度辐射定标为牵引,从仪器高灵敏度优化设计、低频定标的解算方法、仪器背景响应建模三个方面进行了研究。各章节安排如下:

论文第一章首先介绍了红外探测器辐射定标技术的发展,典型热红外载荷的特点,实验室及在轨辐射定标流程、方法等。然后阐述了仪器自身热辐射的仿真、

测量和建模的研究现状。最后结合 CASEarth 热像仪的设计参数和成像模式，提出了本文的研究内容。

论文第二章首先从辐射定标的基本方法出发，分别阐述了基于黑体定标、月球等定标源的辐射定标方法。然后分析了影响辐射定标精度的因素以及辐射定标不确定度的计算方法，最后指出了提升仪器灵敏度、辐射定标精度的途径。

论文第三章研究了仪器温度参数对热像仪成像性能的影响并提出了多温度参数联合优化设计方法。在仪器设计上，我们采用了在镜片后表面增加挡光环、杜瓦内部增加冷阑等设计方案对杂散光进行抑制。对于仪器自身热辐射，我们首先利用 tracepro 在不同温度场进行了仿真。根据仿真计算结果设计了网格梯度温度实验研究了仪器各组件温度对仪器背景响应的影响。最后结合工程约束条件以及热像仪在不同温度场的成像性能，实现了多温度参数的联合优化设计，为高精度的辐射定标奠定基础。

论文第四章对热像仪的低频高效辐射定标方法进行了研究。首先，在低温真空条件下开展了辐射定标实验，针对 4 级 TDI 探测器提出了像元最佳选择模型来提升灵敏度。然后，对实验室定标数据进行了计算，并采用蒙特卡洛模拟法分析了辐射定标不确定度。其次，基于 CASEarth 卫星平台的观测模式，设计了在轨低频定标方案。除黑体外，还引入了月球、恒星作为外部定标源，并在其他卫星上进行了验证。最后，针对背景响应的定量化测量频次低的问题，提出了一种基于随机森林的背景响应预测方法。该方法可实现高频次的背景响应更新，降低了由于背景响应更新频次低带来的定标误差，提升定标精度。

第2章 辐射定标方法及误差分析

高精度的辐射定标是遥感数据量化应用的重要基础。本章介绍了辐射定标基本原理、影响辐射定标不确定度的因素和辐射定标不确定度的计算方法。

2.1 辐射定标方法

辐射定标是建立辐射量（通常是辐亮度）与探测器输出灰度值之间的关系。为了模拟在轨环境，热红外系统的发射前辐射定标通常在真空罐内进行。发射前的定标实验可对仪器的性能进行测试，如暗电流、光谱响应函数、探测器响应的线性度以及探测器的辐射定标系数等。实验室辐射定标是在轨辐射定标的基础。

2.1.1 基于黑体观测的辐射定标方法

黑体是红外探测系统常用的定标源，为辐射定标提供标准的辐射量。在实验时通过改变黑体温度来改变到达探测器的辐射量并记录在不同辐亮度下的探测器输出值。辐亮度的定义为辐射面元在某一方向的面积向该方向的单位立体角内发射的辐射通量，单位为 $\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}$ 。黑体辐射的光谱辐亮度计算公式如式(2.1)所示：

$$L_{\text{planck}}(T, \lambda) = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1} \quad (2.1)$$

其中， h 为普朗克常量， $h = 6.624 \times 10^{-34} \text{W} \cdot \text{s}^2$ ， c 为光速， $c = 2.997925 \times 10^8 \text{m/s}$ ， k 为玻尔兹曼常量， $k = 1.38054 \times 10^{-23} \text{W} \cdot \text{s} \cdot \text{K}^{-1}$ ， λ 为波长， T 为黑体温度。平均光谱辐亮度的计算公式如下，单位为 $\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}/\mu\text{m}$ ：

$$L_{\text{BB}}(T) = \frac{\varepsilon \int L_{\text{planck}}(T, \lambda) \text{RSR}(\lambda) d\lambda}{\int \text{RSR}(\lambda) d\lambda} \quad (2.2)$$

其中， ε 为黑体的发射率， $L_{\text{planck}}(\lambda)$ 为根据普朗克公式计算的黑体辐射的光谱辐亮度，如式(2.1)， $\text{RSR}(\lambda)$ 为波段的相对光谱响应函数。

为了去除仪器背景响应、暗电流和直流偏置的影响，发射前的定标通常会采用冷屏模拟冷空。辐射定标公式的基本表达式如表示：

$$DN_{BB} = DN - DN_{BG} \quad (2.3)$$

$$L_{BB} = \sum_{i=1}^n a_i DN_{BB}^i + b \quad (2.4)$$

DN 为红外系统观测黑体时的探测器输出值, DN_{BG} 为红外系统观测冷空/冷屏时的探测器输出值, DN_{BB} 为去除背景响应后的探测器输出值。实验室定标时, 观测黑体和冷屏的时间间隔很短, 仪器背景响应的变化可以忽略, 将观测黑体的数据减去背景响应数据即可得到黑体辐射对应的灰度值。依据探测器的响应特性, 可用线性定标公式或非线性定标公式来描述辐亮度和输出灰度值之间的关系 (n 一般小于等于 2), 通常采用最小二乘拟合法求得定标系数。

遥感仪器的辐射定标公式、定标系数通常在仪器的使用手册或官网可以查到, 定标公式由于仪器的结构特点、探测器响应的线性度等在式(2.4)基础上有改动。下面将介绍国内外热红外遥感仪器所用的辐射定标公式。

Landsat 8 TIRS, Landsat 9 TIRS-2 由于响应的非线性, 首先对响应的 DN 值线性化, 再进行辐射定标。辐射定标公式分别为线性公式和非线性定标公式, 表达式如下:

$$L_{\epsilon, BB} = b \cdot DN_{BB} + c \quad (2.5)$$

$$L_{\epsilon, BB} = a \cdot DN_{BB}^2 + b \cdot DN_{BB} \quad (2.6)$$

上式中, a 为非线性系数, b 为线性系数, c 为截距。在 Landsat 9 TIRS-2 的两个波段的定标公式中, 截距均很小, 因此定标公式中只有 a 、 b 两个系数。

对 MODIS 和 GOES-R, 定标公式左边的辐亮度不仅包括了黑体的辐亮度, 还包括了观测黑体和冷空时, 由于扫描镜角度不同引入的仪器自身热辐射差异。它们的定标公式分别如公式(1.2)(1.5)所示。

除了线性定标和非线性定标公式, 也有部分热红外遥感仪器如风云二号 D 星采用分段定标的方法进行辐射定标, 解决探测器在低温端的非线性问题。在低温端 (黑体温度小于 250K) 采用二次定标公式, 黑体温度大于 250K 时, 采用线性定标公式进行定标^[12]。

$$L = b_1 \cdot DN + c_1 (DN > DN_0) \quad (2.7)$$

$$L = a_2 \cdot DN^2 + b_2 \cdot DN + c_2 (DN < DN_0) \quad (2.8)$$

DN_0 设置的范围在 600-800 之间。将低温端的线性定标公式更改为非线性定标公式后, 可探测的动态范围增加约 15 个计数值, 该方法有效的提高了探测器在低

温端的定标精度。

2.1.2 基于月球、恒星观测的辐射定标方法

卫星在轨运行时，除了黑体和冷空定标源外，还可采用其他月球或恒星作为外部定标源进行辐射定标。由于恒星辐射特性稳定，通过对恒星的长周期观测，还可对相机的响应稳定性进行分析。

月球已作为定标源在风云二号、MODIS、VIIRS 等热红外波段进行了应用，定标^[30, 103]。月球表面温度范围约为 90K-400K，覆盖了热红外波段的动态范围。热像仪设计的动态范围为 220K--340K，可利用对月观测数据实现全动态范围的辐射定标。此外，在轨时可通过改变积分时间和积分电容调节系统的动态范围，在满月时也可对月球成像。

月球定标首先需要对月球的辐亮度进行建模，如 J. Shaw 等人对月球的辐射特性进行了研究，其发射率随波长发生变化。在大于 6 μm 的热红外波段内，月球的反射率很小，可认为是高发射率的定标源。月球到达像面的辐亮度包括月球的自身辐射、太阳的反射以及大气辐射^[104, 105]。月球的辐亮度计算公式如下^[106]：

$$L_{moon} = \int \tau_{atm}(\lambda) [\varepsilon(\lambda)L(T_{moon}) + r(\lambda)L(T_{solar})] d\lambda + L_{atm} \quad (2.9)$$

通过建立月球辐亮度与灰度值之间的关系，实现基于月球观测的绝对辐射定标。

恒星由于其辐射特性稳定，大气传输模型简单，基于恒星观测的辐射定标已在天文观测卫星上应用，如哈勃望远镜、ASTRO-F 卫星、SPIRIT III 卫星^[107-109]。对地观测卫星的基于恒星观测的辐射定标应用很少提及。

恒星定标在对地观测卫星的难点主要有两个：1.对地观测卫星在对恒星观测时需要调整指向或卫星姿态，能观测的天区范围有限。此外，受到相机灵敏度、口径等的限制，相机可观测到的恒星数量较少。2.遥感相机观测恒星时，可将其近似为点目标。由于像元内响应的非均匀性，探测器接收到的恒星目标能量随其在像面上的位置变化而变化。恒星能量提取误差是恒星定标精度的限制因素之一。

基于恒星的辐射定标是建立恒星能量(通常是辐照度)与响应输出值的关系。常用星表有 WISE 星表、Spitzer 星表等，星表中列出了在天文望远镜观测波段的恒星星等。当待定标相机的波段与星表中的波段不完全相同时，需要将星表中得到的辐照度推算到相机波段的辐照度，如张婉莹等人对 WISE 星表中的部分恒

星利用泰勒展开方法求解恒星温度，并推算相机波段内的恒星能量^[110]。

2.2 热像仪定标误差分析

黑体作为热像仪的主要定标源，辐亮度计算的不确定度是辐射定标不确定度的来源之一。从普朗克计算公式来看，黑体辐亮度的不确定度主要由黑体的测温精度、黑体温度非均匀性、发射率测量的不确定度以及光谱响应曲线的测试不确定度构成。从辐射定标公式看，探测器响应的线性度、背景响应的不确定度、探测器噪声也是定标不确定度的来源。

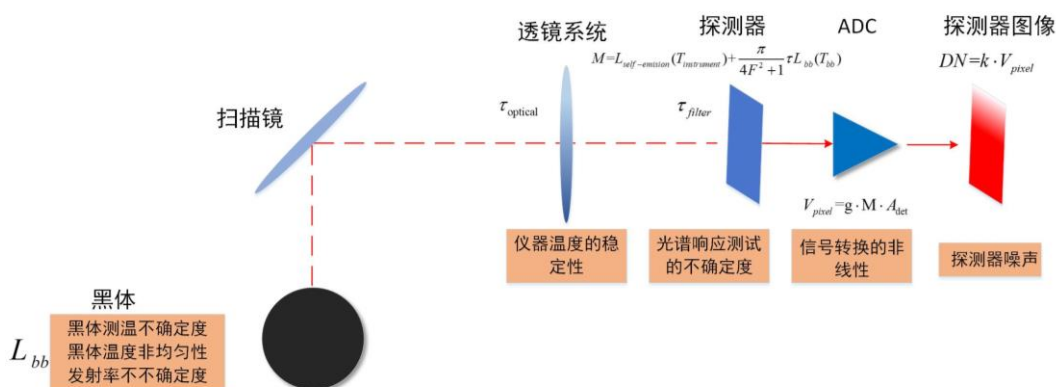


图 2.1 发射前辐射定标误差分类

Figure 2.1 Classification of radiometric calibration errors before launch

不同于发射前定标的多黑体温度点定标测试，在轨定标时通常对某个星上黑体的固定温度点观测。通过对固定温度黑体的高频次观测，实现定标公式中线性系数的高频次更新。非线性系数仅在多温度点观测后才能更新，在轨定标时受到黑体升降温时间的限制，在轨多黑体温度点的观测频次低。此外，CASEarth 长列摆扫热像仪需通过卫星侧摆观测冷空实现仪器热背景响应的测量，观测冷空的频次较低。因此，除了发射前定标试验中的不确定度外，还受到探测器响应率稳定性、在轨仪器温度场稳定性等的影响。

2.2.1 黑体温度及发射率误差分析

黑体的测温精度、发射率以及不确定度通常由黑体手册给出，黑体温度非均匀性可由测试数据得到。根据黑体辐亮度计算公式，由黑体发射率、温度误差引入的辐亮度误差计算公式如下：

$$\frac{\partial L_{bb}}{\partial T_{bb}} = \Delta \varepsilon L_{bb} \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial L_{bb}}{\partial T_{bb}} = \frac{\partial L_{bb}}{\partial T} \Big|_{T_{bb}} \quad (2.11)$$

黑体测温误差对辐亮度计算的影响与黑体温度有关,随黑体温度的增加,辐亮度误差百分比减小。黑体测温误差及发射率的误差由黑体自身辐射特性决定,是系统误差。因此,在选择黑体时,尽量选择黑体发射率高、发射率测量不确定度小、测温误差小的黑体作为星上定标源。

2.2.2 系统光谱响应函数测试误差分析

探测系统的工作谱段通常由观测目标的辐射特性决定,探测器在工作谱段内具有较高的光谱响应。系统的光学透过率(也称光学效率)由光学薄膜器件的特性决定。光学薄膜器件的主要作用为目标能量的传递、响应谱段的限定、带外信号的抑制等。按照光学薄膜所在的元件,可分为扫描镜、红外透镜、杜瓦窗口和滤光片四类光学薄膜。系统的光学透过率为各组件的透过率的乘积。

$$SRF(\lambda) = \prod_{i=1}^n SRF_i(\lambda) \quad (2.12)$$

$SRF(\lambda)$ 为系统的光谱响应函数, $SRF_i(\lambda)$ 为第 i 个组件在特定波长下的光谱透过率, i 从 1 到 n 分别是各组件的透过率,如扫描镜、透镜、杜瓦窗口、滤光片等。

光谱响应测试是实验室辐射定标的重要测试之一,光谱响应函数的精确测量为黑体辐亮度的精确计算奠定基础^[111]。光谱响应的定义为探测器对单色辐射的响应率,是探测器的重要性能指标^[112, 113]。

傅里叶红外光谱仪和光栅光谱仪是常用的两种光谱响应测试设备。光栅光谱仪测试的基本原理光栅衍射。一束光通过狭缝后,经过光栅衍射,获得一系列不同波长的光。从光栅衍射的原理来看,其狭缝的宽度越小,则分辨率越高。但较小的狭缝宽度会使得光通量减小,信噪比降低从而降低光谱响应的测量精度。傅里叶红外光谱仪为干涉型光谱仪,包括红外光源、干涉仪、参考探测器等,利用傅里叶变换和干涉效应获取光谱响应。相比于色散光谱仪,其光学结构简单,具有测试信噪比高、测量精度高和重复性高的优点。

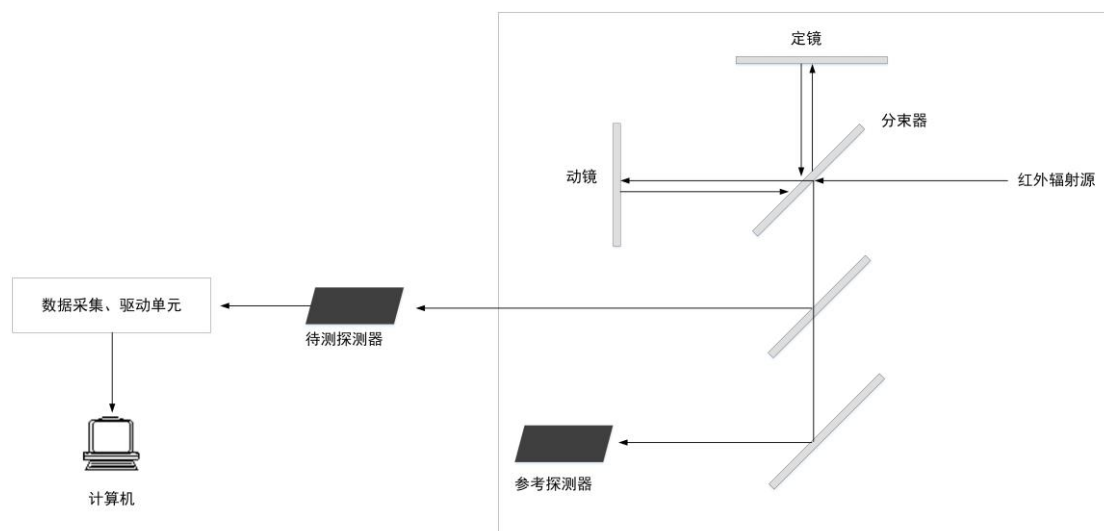


图 2.2 傅里叶红外光谱仪结构图

Figure 2.2 Fourier infrared spectrometer structure diagram

使用傅里叶红外光谱仪对探测器的光谱响应进行测试。测试结束后,通过傅里叶变换求得光源的光谱和探测器的输出响应,计算绝对光谱响应。并将绝对光谱响应归一化得到相对光谱响应。探测器的光谱响应是探测器量子效率和滤光片的透过率的乘积。光谱响应测试的不确定度包括光源的波长不确定度、探测器的噪声以及相位误差等。

2.2.3 探测器噪声信号分析

1) 探测器的成像过程

红外探测器光电探测系统的重要组成部分,主要功能是将接收到的辐射通量转换成的易测量的量(如电压)。根据工作温度的不同,探测器可分为制冷型探测器、高温探测器(High operating temperature detectors)和非制冷型探测器。对于长波探测器,为了降低暗电流,一般为制冷型探测器,工作温度较低,如 Landsat 8 TIRS 探测器的工作温度为 44K, GOES-R 红外探测器的工作温度设置为 60K。

红外焦平面阵列集成了光敏元和读出电路,光敏元是接收红外辐射的区域;读出电路的功能包括对光信号的积分、采样、前置放大、多路传输、信号处理等^[114]。如图 2.3 显示了入射到探测器上的光通量到转换成输出信号的过程及噪声的产生原理。

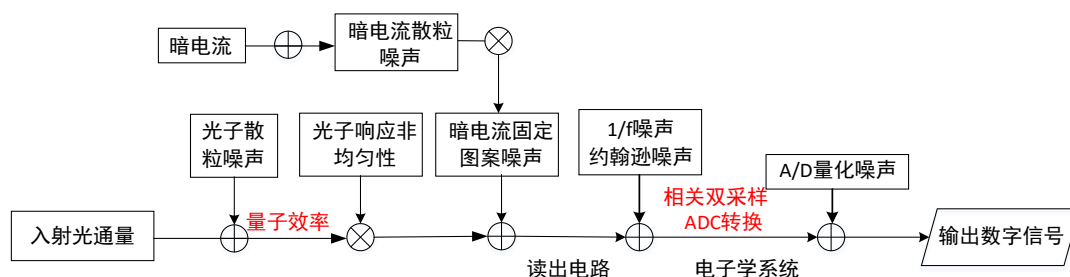


图 2.3 入射光通量到探测器输出数字信号的转换流程

Figure 2.3 Conversion process from incident luminous flux
to detector output digital signal

探测器将入射光通量转换为探测器输出数字信号的过程分为三个部分，光子到电荷的转换，电荷到电压的转换，电压到数字信号的转换。

由于光子的随机起伏特性，探测器接收到的光子数中包含光子散粒噪声，光子到电子数的转换关系由探测器的量子效率决定。光敏元在一个积分周期内产生的电子数是光子数与积分时间、量子效率的乘积。

$$Q = N_{ph} \cdot QE \cdot t_{int} \quad (2.13)$$

Q 为探测器接收到的电荷数量， N_{ph} 是入射的光子数， t_{int} 为积分时间， QE 为量子效率，是光敏元产生的光电子数与入射的光子数之比，是波长的函数。探测器接收到的电荷通过电容器件转换为电压，电荷到电压的增益关系并不是完全的线性关系，这种非线性关系会影响固定图案噪声和散粒噪声的大小。转换后的电压信号经过读出集成电路的前置放大电路被放大。焦平面阵列的像元信号通过多路传输器，如 CCD 和 CMOS 多路读出，切换为单个或多个信号，并输出至读出电路放大。探测器最终输出的信号为数字信号，需要将模拟信号（电压）转换为数字信号，转换关系如公式所示：

$$ADC_{output} = round\left(\frac{V_{signal} - V_{min}}{(V_{max} - V_{min}) / 2^N}\right) \quad (2.14)$$

$round$ 是四舍五入函数， V_{signal} 是信号电压， V_{min} 是最小可量化电压， V_{max} 是最大可量化电压， N 为量化位数。 ADC_{output} 为探测器输出信号值，也称灰度值。

理论上，探测器上产生的电子数与积分时间的关系应为正比，但在电荷转换为电压、电压转换为灰度值等过程中可能会引入非线性。此外，对于部分探测器，电子增益在整个响应范围内是分段线性的。如 Landsat 8 TIRS 和 Landsat 9 TIRS-2 的探测器，当电子数达到满井电荷的 10% 后，增益约为原来增益的 1/3 到 1/4 之

间。因此，探测器响应的线性度也是影响辐射定标精度因素。

2) 红外探测器噪声分析

探测器输出信号的不确定度来自噪声，因此噪声是限制探测系统灵敏度的因素之一。根据是否与信号有关可分为光子散粒噪声和内部固有噪声两大类。

$$n_{total} = \sqrt{n_{shot}^2 + n_F^2} \quad (2.15)$$

其中， n_{shot} 为散粒噪声，包括了信号与非信号光子数、暗电流产生的散粒噪声， n_F 为探测器内部固有噪声。当入射的光子数增加时，噪声的占比会发生变化。探测器内部固有噪声不随入射光通量的变化而变化。

(1) 散粒噪声

光敏元收集光子时，由于光子的随机起伏特性，产生了光子散粒噪声，散粒噪声的统计服从泊松分布。当入射的光子数足够大时，泊松分布可以近似成高斯分布。不仅来源于信号的光子数会产生散粒噪声，对于热红外探测器，来自仪器自身的热辐射的光子也会产生散粒噪声，如光学系统、扫描镜等的自身热辐射。散粒噪声与电子数的关系如公式所示：

$$n_{shot} = \sqrt{N_s} \quad (2.16)$$

N_s 为信号电子数。散粒噪声为信号电子数的平方根，随入射的光子数增加而增加。

除了来自目标和场景的光子会产生散粒噪声，暗电流也会产生服从泊松分布的暗电流散粒噪声。暗电流的散粒噪声为暗电流电子数的平方根，其表达式如下：

$$N_d = \frac{I_d T_{int}}{q} \quad (2.17)$$

$$n_d = \sqrt{N_d} \quad (2.18)$$

I_d 为暗电流，单位为安培， T_{int} 为积分时间， q 为电荷的带电量， N_d 是暗电流的电子数，单位为 e^-/pixel 。探测器各像元的材料不可能完全相同，不同像元的暗电流并不完全相同，产生暗电流固定图形噪声。

(2) KTC 噪声

采样保持电路的作用是在一帧结束时采集前一帧的图像，产生的噪声主要 KTC 噪声。在高灵敏度探测器中，为了消除 KTC 噪声的影响，采用相关双采样电路。相关双采样电路可以对每个像元进行了两次采样，即在一帧积分开始时和一帧结束时进行采样，并输出两次采样的差值。由于两次采样的间隔时间很短，

直流电平偏移和低频漂移很小，相减处理后被消除，采用相关双采样电路可以有效地减少低频噪声。

(3) 1/f 噪声

1/f 噪声也被称为闪烁噪声，是由于两种材料交界处的接触不良造成的，对低频段影响较大。MOSFETS 存在于 CMOS 探测器中的每个像元，因此 CMOS 探测器的 1/f 噪声大于 CCD 探测器的 1/f 噪声。它的功率谱可用 $1/f^n$ 表征，n 取 0.8-2。

(4) 约翰逊噪声

自由电荷载流子与晶格原子碰撞产生约翰逊噪声，也称热噪声，存在于所有探测器中。热噪声的电压表达式为：

$$V_{\text{Johnson}} = \sqrt{4kT_d R_d \Delta f} \quad (2.19)$$

其谱密度的表达式为：

$$V_{\text{Johnson}} / \sqrt{\Delta f} = \sqrt{4kT_d R_d} \quad (2.20)$$

k 为玻尔兹曼常数， T_d 为像元的温度， R_d 为像元的电阻， Δf 为电路带宽。从公式来看，热噪声与像元的电阻、温度有关；其谱密度与频率无关，因此是白噪声。

(5) 产生复合噪声

产生复合噪声是载流子产生和复合的随机性引起的起伏，存在于所有的光子探测器中。其噪声电压的表达式为

$$V_{g-r} = R_d \cdot I \sqrt{\frac{4\tau \cdot \Delta f}{\bar{N}(1 + 4\pi^2 f^2 \tau^2)}} \quad (2.21)$$

其中， τ 为载流子寿命， f 辐射调制频率， $\bar{N}$ 为像元的平均载流子数量。从公式来看，产生复合噪声的谱密度与频率有关。在低频和中频段，可认为是白噪声。在光伏探测器中，只有载流子产生率的起伏引起的噪声，没有载流子复合率起伏引起的噪声。因此，产生复合噪声小于光导探测器的产生复合噪声。

(6) 量化噪声

探测器最终输出的是数字信号，需要通过 AD 转换器将模拟信号转换成数字信号。连续的模拟信号值变成了离散的数字信号值，该过程引入的误差均匀的分布在 ± 0.5 之间，即量化噪声服从均匀分布的，噪声电子数可用公式表示为：

$$Q_{ADC} = \frac{Q_{well}}{2^N} \quad (2.22)$$

$$n_{ADC} = \frac{Q_{ADC}}{\sqrt{12}} \quad (2.23)$$

Q_{ADC} 为 DN 值每变化 1 时对应的电子数, Q_{well} 为满井电荷, N 为量化位数, AD 转换是在有限的精度下转换的, 量化噪声随量化位数的增加而减小。目前, 红外探测器的量化位数多为 12bit 及以上。

(7) 非均匀噪声

非均匀噪声的来源有四种, 分别为探测器的响应非线性, 探测器光谱相应的非均匀性, 像元的 $1/f$ 噪声和阵列的 $1/f$ 噪声。

探测器输出的电信号很弱, 因此需要采用多级放大器对信号放大后才能驱动信号处理等后续电路。每个像元/放大器间的增益和偏置的差异会产生固定形状的噪声。不同像元的响应差异几乎不随时间变化, 因此像面的非均匀特性也很少发生变化。探测器光谱响应的非均匀性很难用数学表达式描述, 且校正效果较差。 $1/f$ 噪声是一个随时间缓慢变化的量, 如果仅在开机时进行非均匀校正, 非均匀噪声会随时间增加而增加。因此, 探测器需要定期更新非均匀校正系数。

(8) 总噪声

探测器的总噪声为各部分噪声平方和的均方根, 可用下式表示:

$$n_{system} = \sqrt{n_{shot}^2 + n_d^2 + n_{ADC}^2 + n_{KTC}^2 + n_{1/f}^2 + n_{g-r}^2 + n_{Johnson}^2 + n_{FPN}^2} \quad (2.24)$$

入射到探测器的光通量变化时, 各组分噪声的占比也会发生变化。在入射光通量较小时, 探测器内部的固有噪声占主导地位, 随着入射光通量的增加, 散粒噪声占主导地位。在计算时, 通常取多帧的平均值进行计算, 可减小时间噪声的影响; 对于空间噪声, 通常采用两点法或多点法进行校正。

3) 系统灵敏度

噪声等效温差常用来描述系统的灵敏度, 表示方法有噪声等效功率、噪声等效辐亮度、噪声等效辐照度, 噪声等效温差。对于热红外波段, 常用噪声等效温差来描述系统的灵敏度。噪声等效温差可表征仪器的最高温度分辨能力, 其定义为探测器输出值的差值等于该输出值下的噪声均方根时, 输出值的差值对应的温度变化。在实验室定标实验时, 通常采用黑体多帧的观测数据计算噪声等效温差, 其计算公式如所示:

$$noise = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (DN_i - \overline{DN})^2} \quad (2.25)$$

$$SNR = \frac{\overline{DN}}{noise} \quad (2.26)$$

$$NEdL = \frac{L}{SNR} \quad (2.27)$$

$$NEdT = \frac{NEdL}{\frac{dL}{dT}} \quad (2.28)$$

$$\frac{dL}{dT} = \int \frac{2h^2 c^3}{kT^2 \lambda^6} \cdot \frac{e^{hc/k\lambda T}}{(e^{hc/k\lambda T} - 1)^2} d\lambda \quad (2.29)$$

$noise$ 为探测器的噪声, DN_i 为探测器观测时的第 i 帧的信号输出, $\overline{DN}$ 是观测 N 帧数据的输出平均值, L 是目标的辐亮度。 dL/dT 是根据普朗克公式计算的黑体的微分辐亮度, 是与温度相关的函数。热像仪采用摆扫的方式成像, 在实验室测试中, 采用采用 1000 行的探测器输出数据来计算噪声, DN_i 为探测器观测时的第 i 行的信号输出。平均噪声等效温差即为像面上有效像元的噪声等效温差的平均值。本文中为了计算简便, 所用的噪声等效温差值均为平均噪声等效温差。

从噪声等效温差的定义来看, 提升噪声等效温差的途径为降低探测器的噪声和增大探测器的增益。散粒噪声随输入光通量的变化而变化, 散粒噪声的电子数与探测器产生电子数的均方根呈线性关系。

对于热红外波段, 仪器内部的杂散辐射是仪器温度的函数, 其信号的比例不可忽略。在目标光通量不变的情况下, 通过降低仪器温度, 可降低仪器自身热辐射产生的光子数, 从而降低散粒噪声提高仪器灵敏度。

探测器在相同条件下对同一目标观测时, 产生的电子数只与探测器的积分时间有关。当系统的积分时间固定后, 根据系统的观测目标的温度范围, 即仪器内部杂散辐射、暗电流和目标的产生的电子数总和接近满井电荷时, 选用该积分电容。探测器的增益与积分电容成反比, 满井电荷由积分电容决定。

从公式来看, 噪声等效温差是目标温度的函数, 随目标温度的降低而增大。对于热红外波段, 通常利用观测 300K 黑体时的 $NEdT$ 来衡量仪器性能并比较, 如 MODIS 等热红外载荷。

2.2.4 探测器背景响应稳定性分析

在辐射定标计算时,探测器响应的稳定性包括了探测器响应稳定性和背景响应稳定性两部分。使用非线性定标公式的遥感仪器,非线性定标系数的更新需要多黑体温度点的数据。受到黑体升降温时长等因素的限制,黑体升降温频次较低,因此非线性系数的更新频次也较低,即仪器响应的稳定性是影响定标的一个因素。

所有高于绝对零度的物体均会向外界辐射能量,即红外探测系统观测冷空或冷屏时,也会接收来自系统各组件如透镜、扫描镜的辐射。仪器内部杂散辐射一部分来源于光学元件的辐射如光学透镜、扫描镜,该部分辐射可以直接通过光路传输进入探测器中,另一部分来源于位于探测器视场外的结构,如镜筒内壁,经过反射到光路中的辐射。探测器观测目标时电子数的组成如式(2.30)所示:

$$N = N_{signal} + N_{self-emission} + N_{dark} \quad (2.30)$$

N 为探测器观测某一目标时探测器产生的电子数, N_{signal} 为由目标产生的电子数, N_{dark} 为暗电流产生的电子数, $N_{self-emission}$ 为仪器内部散射产生的电子数。探测器产生的光电子数量与量子效率成正比,单个光敏元在给定的积分时间下,产生的光电子数量为:

$$N_s = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \omega \cdot A_o \cdot \frac{\lambda}{hc} \cdot L_{\lambda} \cdot \eta \cdot t_{int} \cdot \tau(\lambda) d\lambda \quad (2.31)$$

其中, N_s 为光敏元在一个积分周期产生的信号电子数, A_o 为入瞳面积, ω 为瞬时视场立体角, η 为量子效率, t_{int} 为积分时间, $\tau(\lambda)$ 为光学效率。

探测器接收到的仪器自身辐射是仪器自身温度、发射率和传输路径等的函数,抑制仪器自身热辐射的主要途径是降低仪器自身的发射率、降低辐射传输路径中的反射及降低仪器自身温度。

仪器自身热辐射的大小和稳定性均是影响仪器灵敏度的重要因素。CASEarth 长线列摆扫仪器需要卫星侧摆才能观测冷空,在轨冷空观测的频次较低。在轨仪器温度场的变化使得背景响应发生变化,给辐射定标计算带来误差。背景响应变化对辐射定标计算的影响如图 2.4 所示。

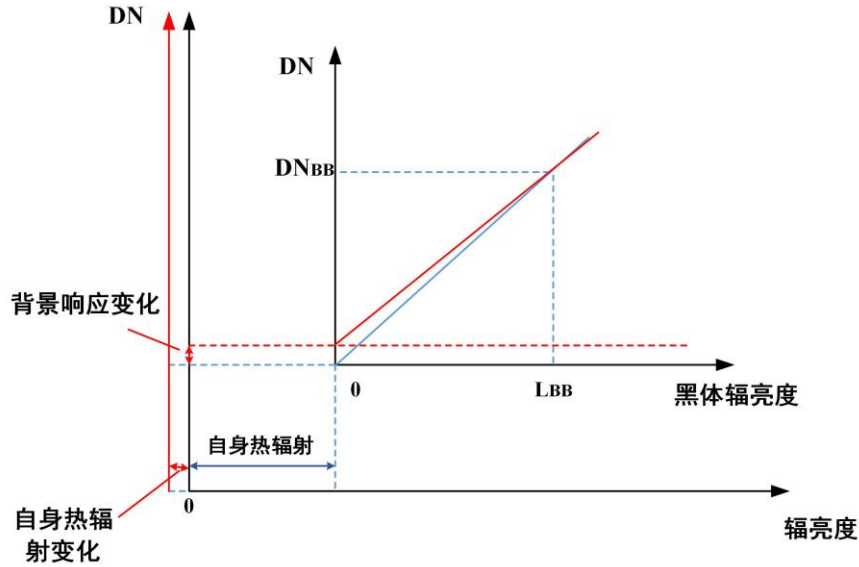


图 2.4 背景响应变化对辐射定标的影响

Figure 2.4 Influence of background response changes on radiometric calibration

2.3 辐射定标精度评估方法

测量偏差和不确定度是常用的辐射定标精度评估方法。测量偏差通过与目标的实际测量值比较求得，如辐亮度、温度等。常用的不确定度计算方法有微扰法和蒙特卡洛法^[47, 66, 115]。

辐射定标的不确定度主要来源于辐亮度和探测器输出信号的不确定度。辐亮度的不确定度由黑体测温和控温的不确定度、黑体发射率的不确定度、相对光谱响应的不确定度和仪器自身热辐射（背景响应）的不确定度等。

微扰法是根据误差传播理论计算的。误差传播理论是观测值的误差与其函数误差之间的关系。以线性定标公式为例(2.32)，介绍微扰法计算辐射定标的不确定度。在辐射定标不确定度计算中，忽略高阶项的影响，仅考虑一阶项对辐射定标的不确定度^[116]。辐射定标不确定度的计算公式如式(2.33)所示。

$$L_e = a \cdot DN_e + b \quad (2.32)$$

$$\frac{dL_e}{L_e} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{L_e(u_i + du_i) - L_e(u_i)}{L_e} \right)^2} \quad (2.33)$$

$$L_e = f(a, b, T_{BB}, \varepsilon_{BB}, DN_{BB}, DN_e, SRF) \quad (2.34)$$

其中，辐亮度不确定度包括定标系数、黑体温度、黑体发射率、黑体响应 DN 值、光谱响应函数、观测 DN 值的不确定度。 u_i 代表这些变量的不确定度。探测器输

出信号的不确定度可用噪声值、噪声等效温差或者噪声等效温度来表征。噪声越小表示其对不确定度的影响越小。

利用微扰法计算不确定度时，假设所有变量服从正态分布，而蒙特卡洛法可以模拟多种概率分布。蒙特卡洛法是模拟随机现象的数学方法。利用蒙特卡洛法计算不确定度通常是通过 `matlab` 等工具按照一定的分布如高斯分布生成一组随机数，并将随机数代入数学公式求出不确定度^[117, 118]。

$$u_c^2 = \sum_{i=1}^n u_i^2 \quad (2.35)$$

$$u = k \cdot u_c \quad (2.36)$$

其中， u_i 是单个变量的不确定度引入的射定标不确定度， u_c 是总的辐射定标不确定度也称标准不确定度，根据方差合成定理计算如式(2.35)。蒙特卡洛计算不确定度所用的变量与微扰法相同。除了标准不确定度外，实际计算中还常用扩展不确定度描述不确定度，标准不确定度与扩展不确定度的关系如式(2.36)。当变量服从正态分布时，标准不确定度置信度为 68.27%；当 $k=1.414$ 时，扩展不确定度的置信度为 95%。变量服从不同的分布时， k 值对应的置信度也不同。

辐射定标的不确定度常用百分比表示，在计算时辐射定标不确定度中占比较小的因素可以忽略。通过分析辐射定标不确定度中各变量的占比及产生原因，可对仪器的设计、参数选取、温度控制等提供指导。

2.4 本章小结

本章介绍了常用的辐射定标公式，从黑体温度、发射率、探测器噪声和背景响应的不稳定性等方面对辐射定标的影响进行了分析，并介绍了辐射定标不确定度的计算方法。对于 CASEarth 红外热像仪，定标源的辐亮度测量精度仪器的灵敏度以及动态范围等的提升均是提升热像仪辐射定标精度的关键因素。

第3章 摆扫式热像仪多温度参数联合优化设计

暗电流和仪器内部杂散辐射的大小会对仪器的辐射分辨率、探测的动态范围等性能产生影响。本章针对仪器灵敏度的提升进行了热像仪多参数联合优化设计的研究。首先,分析了探测器的暗电流、噪声等性能与红外焦平面温度的关系,并根据功耗限制选择了红外焦平面温度。其次,采用在透镜后加入挡光环、杜瓦两级冷阑等设计方案减少视场外的杂散光。利用 tracepro 仿真建模的方法分析了热像仪受到外部杂散光影响的大小,并分析了不同仪器温度场下各组件自身热辐射的占比。在整机装配完成后,基于自身热辐射仿真结果设计了温度网格实验,分析了透镜温度、扫描镜温度等组件温度对内部杂散辐射的影响。在 CASEarth 卫星的体积、功耗以及散热资源有限的情况下,结合工程约束条件,优化设计了系统各组件的温度,提升仪器成像性能。最后,以信背比、噪声等效温差、暗电流与光电流比例的联合指标对系统的成像性能进行评估。结果表明,系统的成像性能与 Landsat 8 相当。

3.1 热像仪成像系统简介

3.1.1 低温光学系统设计方案

热像仪由一维指向机构、透镜系统、黑体、散热板、探测器制冷机组件、综合控制电箱、冷箱等子系统组成,如图 3.1 所示。热像仪采用一维扫描机构实现大幅宽下的目标信息获取,扫描精度优于 $6''$ (物方 3σ)。通过控制扫描镜的角度和卫星姿态调节,可以实现全口径黑体、冷空和地球场景的视场切换。在轨运行时,热像仪定期观测黑体和冷空,实现在轨定标系数的更新。热像仪光学系统采用了全光路低温的设计方案来减小仪器自身热辐射,目标经透镜系统后聚焦至长波焦面组件,由探测器对光信息接收并进行光电转化为电信号,最终由综合控制电箱实现对目标信息的获取并下传图像。

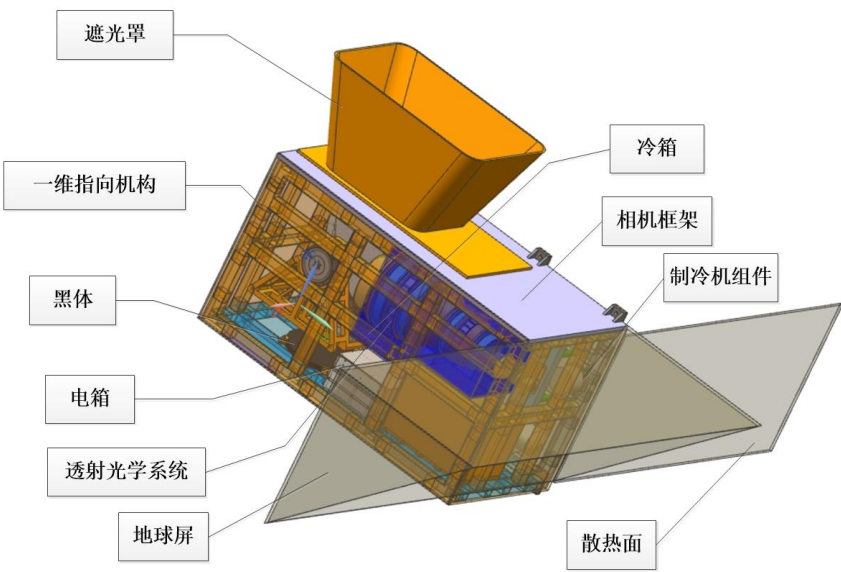


图 3.1 CASEarth 卫星热像仪载荷结构

Figure 3.1 The location of various subsystems on the CASEarth TIRI

表 3.1 热像仪的设计指标

Table 3.1 Design requirements of TIRI

项目	设计指标
幅宽	300km
像元分辨率	30m
探测谱段	8-10.5 μ m 10.3-11.3 μ m 11.5-12.5 μ m
动态范围	220K-340K
扫描精度	$\leq 6''$ (物方, 3σ)
F 数	1.94
口径	260mm
凝视视场	7.0°
扫描视场	$\geq 33.1^\circ$
量化位数	12bit

热像仪光学系统采用四块折射式透镜成像，锗和硒化锌这两种材料的折射率是温度的函数。透镜的温度会影响光学系统的焦距，在轨工作时可以进行变温调焦。在火箭发射过程中，受到冲击和振动的影响，可能造成像面离焦。变温调焦的工作原理是通过改变透镜的工作温度，使得光学系统重新理想成像。根据系统

焦距与工作温度的关系以及系统的调焦需求,热像仪的光学系统的变温范围为 $\pm 10\text{K}$ 。

热像仪的光学口径设计值为 260mm , F 数为 1.94, 在光学衍射极限下成像。凝视视场约 7.0° , 扫描视场大于 33.1° 。扫描镜放置在光学透镜前,通过摆扫的方式实现 300km 大幅宽。光机系统采用深低温分级和全光路低温的设计可有效降低红外仪器背景辐射,提升相机的探测能力和灵敏度。热像仪的光学结构如图 3.2 所示。

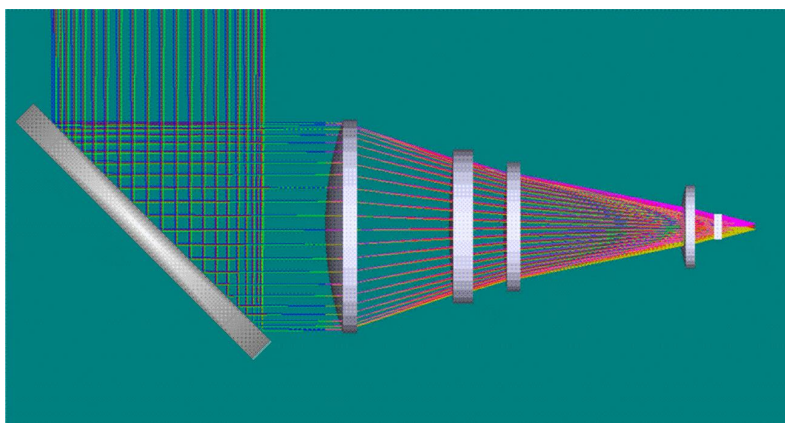


图 3.2 热像仪的透射式光学系统结构图

Figure 3.2 The structure diagram of optical system of the TIRI

3.1.2 长线列探测器组件设计方案

红外焦平面及其制冷组件是红外成像系统重要的组成部分,目标经四块透镜后到达红外焦平面,实现红外辐射到电信号的转换。热像仪在沿轨方向共有 2000 个像元,在垂直飞行方向摆扫实现 300km 的幅宽。

探测器包含了 4 个 $512 \times 4 \times 3$ 碲镉汞红外焦平面探测器模块,单个像元尺寸为 $30\mu\text{m} \times 30\mu\text{m}$ 。按照“品”字型拼接在一块基板上,每两个模块间在列方向重叠 25 个光敏元,拼接后的每个波段探测器的像元规模为 1973×4 像元。探测器共设置三个热红外波段,采用集成滤光片的对三波段进行分光,三个波段分别为 $8\text{--}10.5\mu\text{m}$ 、 $10.3\text{--}11.3\mu\text{m}$ 和 $11.5\text{--}12.5\mu\text{m}$ 。

滤光片由 4 片尺寸相同的复合滤光片组成,每个模块对应一片单独的滤光片。为了减小三波段间的光学串扰,三个波段分别对应三个透光区域,其余区域都镀上 200nm 左右厚度的金属 Ni-Cr 膜。此外,为了减小由于多次反射产生的光学串扰,将滤光片下表面至探测器衬底的距离设计为 0.55mm 。每个波段的光

敏元周围用哑像元隔离，两个波段的间隔为 26 个像元，以此减小边缘效应和波段间的光学串扰。红外焦平面探测器的四个模块排布如图 3.4 所示。

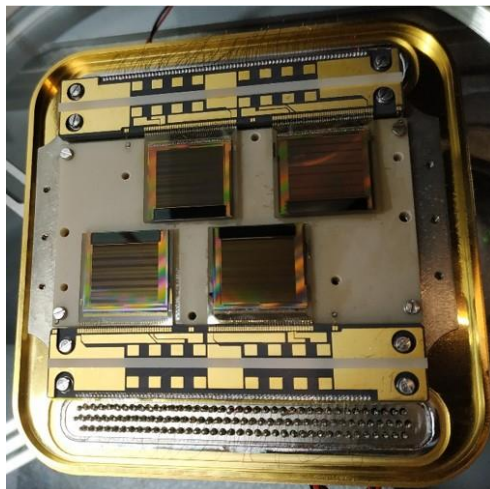


图 3.3 探测器实物图

Figure 3.3 Picture of focal plane array

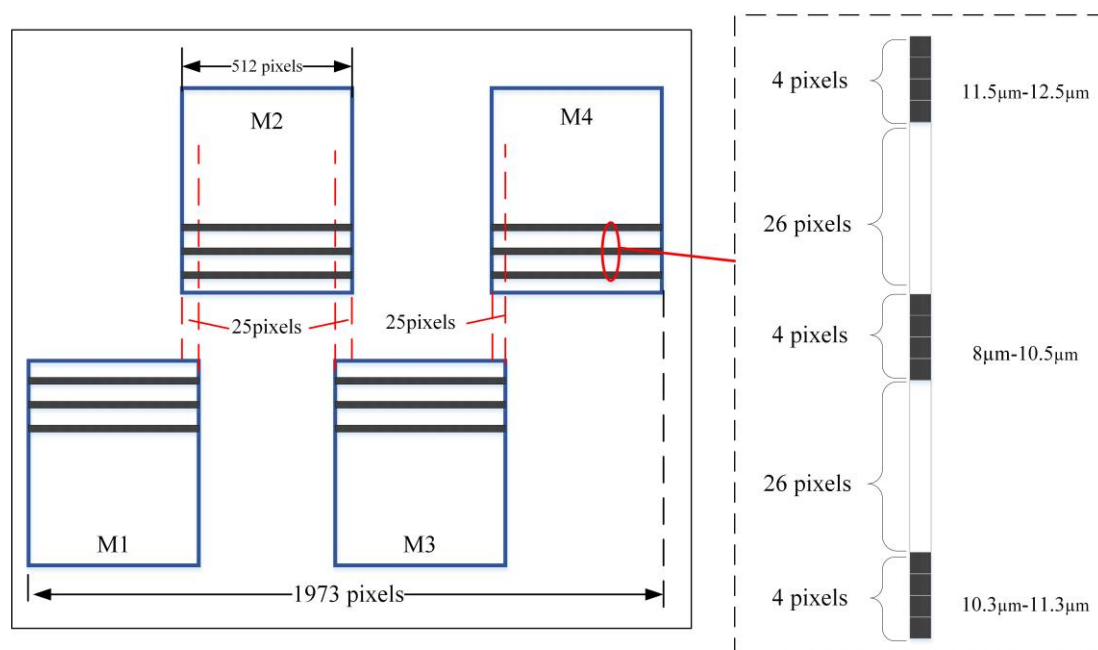


图 3.4 红外焦平面排布。4 个模块分别记为 M1,M2,M3,M4，三个波段分别记为 Band1($8\mu\text{m}$ - $10.5\mu\text{m}$),Band2($10.3\mu\text{m}$ - $11.3\mu\text{m}$),Band3($11.5\mu\text{m}$ - $12.5\mu\text{m}$)。

Figure 3.4 The structure of infrared focal plane. The 4 modules are respectively marked as M1, M2, M3, M4, and the three bands are respectively marked as Band1 ($8\mu\text{m}$ - $10.5\mu\text{m}$), Band2 ($10.3\mu\text{m}$ - $11.3\mu\text{m}$), Band3 ($11.5\mu\text{m}$ - $12.5\mu\text{m}$)

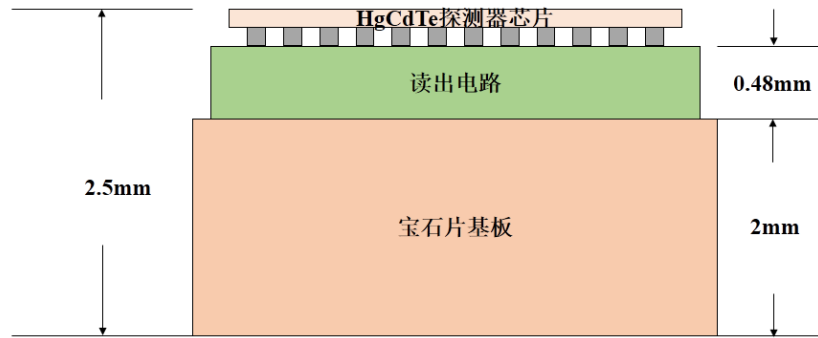


图 3.5 红外焦平面模块侧视图

Figure 3.5 Lateral view of infrared focal plane module

红外焦平面阵列的结构包括光敏元和读出电路。探测器输出的电平很小，读出电路是高集成度电路，具有红外探测器信号转换、前置放大以及多路传输等功能。图 3.5 为热像仪红外焦平面模块的侧视图，碲镉汞探测器芯片与读出电路的连接方式为直接焊互连，电学引出是读出电路通过宝石基板的金属引线来实现。

红外探测器制冷组件包括焦平面、杜瓦、制冷机和电控。红外焦平面需要工作在低温环境下，采用机械制冷方式进行制冷。将探测器封装在杜瓦内，与脉管制冷机耦合获得焦平面探测器工作所需的冷量，并实现与外界环境的隔热。杜瓦是红外探测器的封装和保护装置，其主要功能是实现与制冷机、光学系统、机械结构以及电子学系统的耦合，并为探测器提供低温工作环境。杜瓦内部的结构主要包括窗口、冷光阑、滤光片，探测器和电极引线等部件。

热像仪的杜瓦中设计了两级冷光阑，设计结构如图 3.6 所示，在器件响应率不变的情况下，可以抑制杂散信号及噪声，提升系统的信噪比和成像质量。为了进一步抑制杂散光及减小杜瓦的自身热辐射，在材料和工艺上均采取了一定的优化设计方案。杜瓦薄壁为 0.2mm 均由镍电铸而成，冷光阑的外表面抛光工艺以降低辐射，内表面采用镀黑镍工艺以抑制杂散光。多节冷光阑与滤光片支架焊接成型后安装固定到杜瓦内电极板上，如图 3.6 (b) 所示。

由于热像仪采用长线列摆扫的方式成像，积分时间较小，探测器的灵敏度受到限制。为了提升探测器的灵敏度，采用了 4 级 TDI（时间延迟积分）的信号处理方式。TDI 技术可在不改变系统参数的条件下提升系统的信噪比。探测器每个模块最终输出的图像矩阵大小为 512×1 。

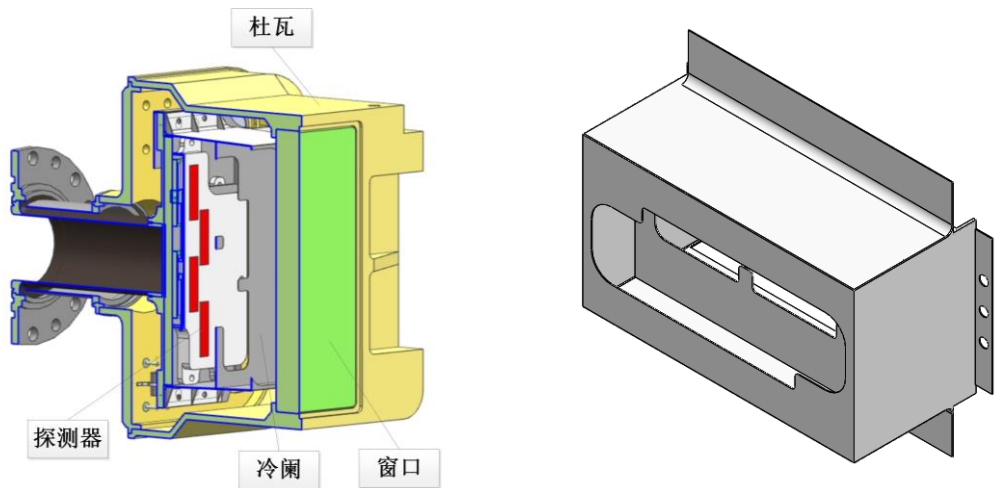


图 3.6 杜瓦组件结构图 (a)杜瓦的设计结构(b)冷光阑设计图

Figure 3.6 Dewar structure diagram (a) Profile of dewar (b) The design structure of Cold stop

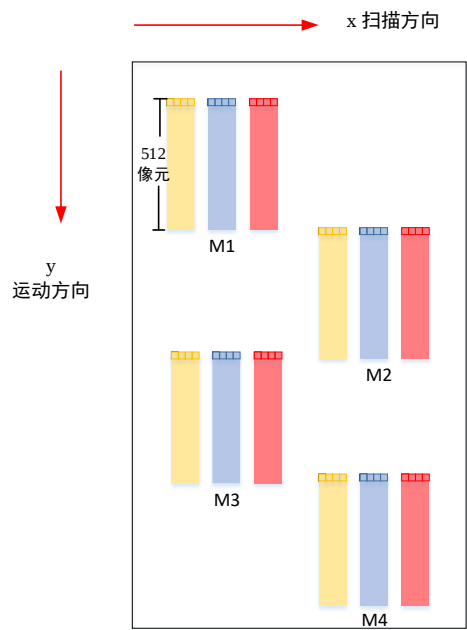


图 3.7 TDI 方向示意图

Figure 3.7 TDI direction diagram

图 3.7 中 x 方向是扫描方向, y 方向是沿轨飞行方向。对于同一列像元, 4 个像元依次扫过同一目标, 将 4 个像元的信号进行累加, 累加后的信号值增加为原来的 4 倍, 而噪声由于互不相关, 累加后噪声增加为原来的 2 倍, 因此理论上信噪比可提升 2 倍^[119]。

探测器中无效像元输出的灰度值不能反映目标的辐射特性, 通常表现为像面上的暗点或亮点。在进行 4 级 TDI 处理之前, 首先对像面上的盲元标记, 并对

盲元进行替换来提高图像质量。

3.2 焦平面温度对成像性能的影响

暗电流的大小及其稳定性是影响探测器噪声、动态范围和辐射定标精度的重要因素。本节开展了探测器组件级测试，建立了杜瓦窗口的自身热辐射仿真模型并对不同焦平面温度下探测器的暗电流进行解算。依据测试结果，分析了暗电流、探测器噪声随红外焦平面温度的变化关系，为实现探测器的高灵敏度奠定了基础。

3.2.1 探测器组件级测试

暗电流的大小与探测器的工作温度有关，暗电流随红外焦平面的工作温度升高而升高^[120, 121]。为了降低长波红外探测器的暗电流，其工作温度通常设置的较低，如 Landsat 8 TIRS 探测器的工作温度仅为 44K。因此，探测器工作温度的合理选取是实现探测器高灵敏成像的重要一环。

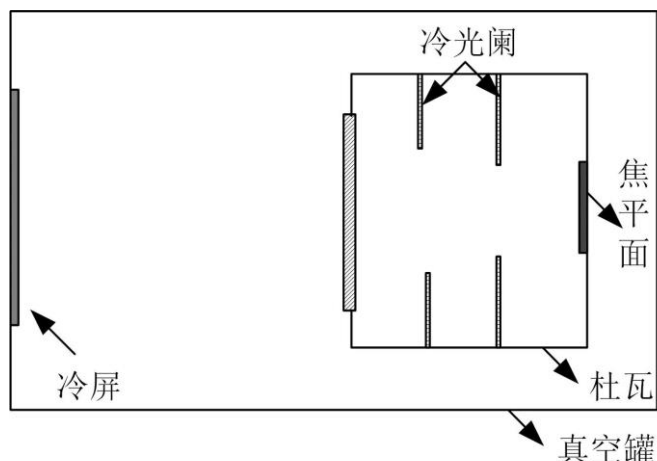


图 3.8 探测器组件测试系统示意图

Figure 3.8 Schematic diagram of detector test system

我们采用组件级测试的方法对封装后的探测器的暗电流进行测试。将探测器组件置于真空罐内，在不接光学系统的情况下，探测器直接对冷屏成像，本文将该实验记为探测器组件测试。在杜瓦内其他组件的温度保持不变的条件下，调节红外焦平面的温度，在 50K，53.5K，55K，57.5K，60K 的温度下，分别进行一系列的变积分的冷屏数据采集，并计算红外焦平面在不同温度下的暗电流值。该测试方法有效的克服了在对整个热像仪系统测试时，光学系统的杂散辐射难以从

探测器输出信号中分离的问题。

冷屏的温度设为 100K，其自身热辐射可以忽略。探测器组件测试时，入射的辐亮度主要来自杜瓦的自身热辐射。即探测器输出的信号中由杜瓦的自身热辐射信号、暗电流和直流偏置三部分构成。

$$DN = DN_{Dewar} + DN_{dark-current} + DN_{bias} \quad (3.1)$$

直流偏置是电路的固有属性，不随积分时间的变化而变化。根据一系列不同积分时间的探测器输出数据，利用最小二乘拟合方法可以得到探测器的直流偏置 B 。

$$DN = k \cdot t + B \quad (3.2)$$

DN 为探测器观测冷屏时的输出灰度值， t 为积分时间， k 为输出信号随积分时间变化的斜率， B 为拟合得到的直流偏置。将观测冷屏的输出灰度值去除直流偏置后，即可得到暗电流与杜瓦自身热辐射对应的输出灰度值。下一节将对杜瓦建模，分析其自身热辐射在输出信号中的贡献。

3.2.2 杜瓦窗口的自身热辐射分析

杜瓦窗口温度的变化可以通过杜瓦窗口周围的贴片电阻监测，而杜瓦内部的温度无法测量，只能通过仿真的方法对其内部组件如冷光阑等的温度进行仿真。

根据仿真结果，在制冷机冷指温度为 65K 时，冷光阑、探测器支架的工作温度均低于 100K，因此可以忽略它们的自身热辐射，仅对杜瓦窗口的自身热辐射建模^[122]。根据式 2.4，杜瓦窗口的温度、立体角等对杜瓦窗口的在一个积分周期内，光敏元产生的信号电子数进行计算，三个波段计算的杜瓦窗口自身热辐射对应的电流如下表：

表 3.2 杜瓦窗口对应的电流

Table 3.2 Current corresponding to Dewar window		
杜瓦窗口温度(K)	/	204.15
杜瓦窗口的 电流(nA)	B1	0.012
	B2	0.014
	B3	0.012

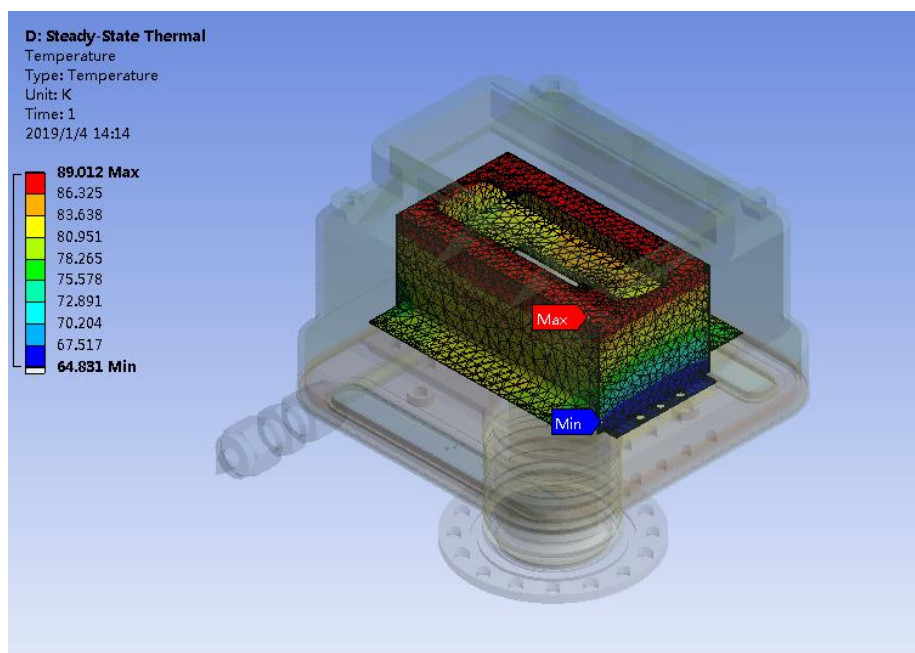


图 3.9 杜瓦内部温度分布

Figure 3.9 The temperature distribution of the Dewar

从表 3.2 杜瓦窗口对应的电流来看, 杜瓦窗口自身热辐射的输出灰度值占观测冷屏时输出灰度值的比例很小, 仅为 10%。

3.2.3 暗电流与红外焦平面温度的关系研究

探测器的暗电流是制约探测器的目标信号可响应范围的因素之一。从暗电流产生机制来看, 碲镉汞探测器的暗电流包括扩散机制暗电流、产生复合机制暗电流、直接隧穿机制电流和表面漏电流^[123, 124]。当红外焦平面温度处在不同的温度区间时, 起主导作用的电流类型不同, 暗电流随温度变化的规律也不同。从热像仪所用的探测器的暗电流产生机制来看, 在红外焦平面温度的温度设置范围内 (50K-60K), 扩散电流占主导作用, 即理想因子为 1, 扩散电流与红外焦平面温度的关系通常用下式表示:

$$I_g \propto T^{1/2} \exp(-E_t / k_B T) \quad (3.3)$$

其中, I_g 为扩散电流, T 为红外焦平面温度, E_t 为陷阱能级, k_B 为玻尔兹曼常数^[125, 126]。由公式可知, 探测器设计完成后, 暗电流主要受红外焦平面的工作温度的影响, 随红外焦平面的温度降低而减小。

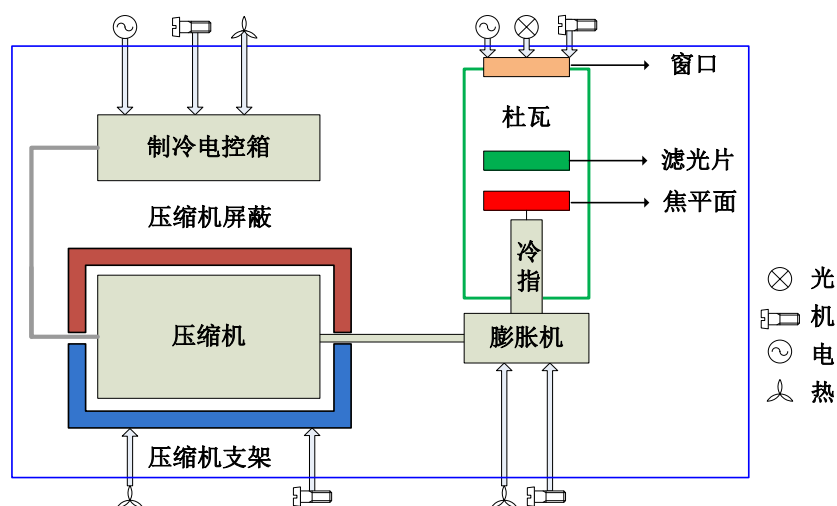


图 3.10 红外焦平面组件工作原理图

Figure 3.10 Schematic diagram of focal plane array

在探测器组件测试时，分别采集了不同积分时间、不同红外焦平面温度下的冷屏观测数据，将探测器杜瓦窗口的自身热辐射和直流偏置去除获取暗电流。

对同一红外焦平面温度的多积分时间的背景响应数据进行最小二乘拟合，将拟合得到的斜率 k (DN/s) 转换为暗电流与杜瓦自身热辐射对应的电子数。在每个红外焦平面工作的温度点下，根据式(3.2)求得斜率 k ，并将灰度值转换为电流值，转换公式为：

$$I = \frac{k}{DN_{\max}} \cdot Q_{\text{well}} \quad (3.4)$$

$$I_{\text{dark}} = I - I_{\text{dewar}} \quad (3.5)$$

其中， $DN_{\max}$ 为探测器的最大响应 DN 值， t_{int} 为积分时间， Q_{well} 为满井电荷量， I_{dark} 为暗电流， I_{dewar} 为杜瓦窗口对应的电流。

表 3.3 不同红外焦平面温度下的暗电流测试值

Table 3.3 Dark current test values at different infrared focal plane temperatures

温度 (K)	B1 (nA)	B2 (nA)	B3 (nA)
50.0	0.028	0.024	0.026
53.5	0.073	0.066	0.070
55.0	0.109	0.101	0.107
57.7	0.267	0.256	0.265
60.0	0.507	0.505	0.507

三个波段暗电流随焦平面温度的变化如上表所示，暗电流随红外焦平面温度

降低而降低,在红外焦平面温度为 60K 时,三个波段的暗电流的值分别为 0.507, 0.0505, 0.507nA, 约为红外焦平面温度为 55K 时的 5 倍。红外焦平面温度从 55K 变化到 50K 时,暗电流约下降 4 倍。

根据 2.2.3 节探测器噪声的分析来看,探测器组件级测试时,噪声主要由暗电流散粒噪声、仪器自身辐射散粒噪声和探测器内部固有噪声构成。从散粒噪声与电子数的关系式(2.16)可以看出,散粒噪声随电子数的增加而增加。当红外焦平面、系统组件温度降低时,暗电流和仪器背景产生的电子数减少,散粒噪声也会随红外焦平面温度、组件温度的降低而降低。我们对不同焦平面温度的噪声进行了统计分析。

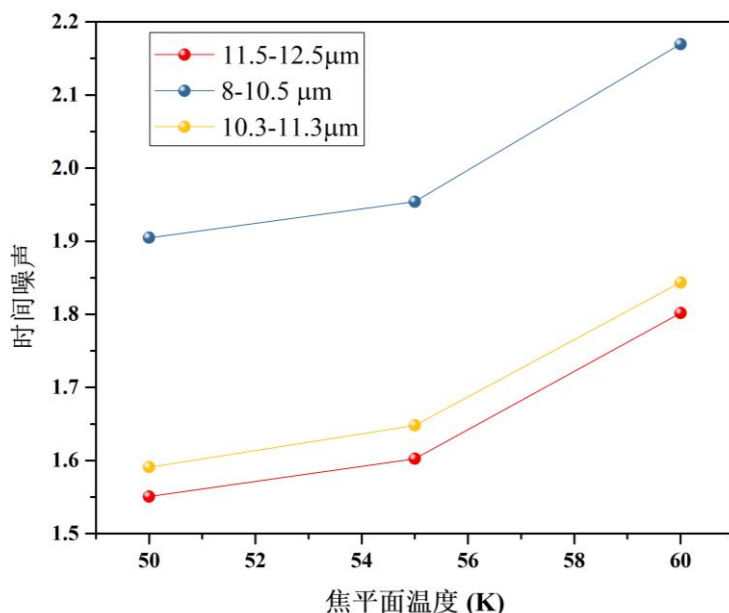


图 3.11 噪声随焦平面温度的变化

Figure 3.11 Noise changes with focal plane temperature

从图 3.11 来看,三个波段的时间噪声均随焦平面温度的降低而降低,其中波段 2 的噪声大于波段 1 和波段 3 的噪声。对于波段 2,波段宽度约为波段 1 和波段 3 的两倍,仪器背景自身热辐射对应的辐亮度约为波段 1 和波段 3 的两倍。因此,对同样的目标观测时,探测器产生的电子数更多,波段 2 的噪声大于波段 1 和波段 3。当探测器温度从 60K 降低至 55K 时,噪声降低了约 0.2,从 55K 降低至 50K 时,噪声降低了约 0.05。由于没有光学系统的自身热辐射,仪器背景的噪声很小,探测器的内部固有噪声占噪声的主要部分。当焦平面温度低于 55K 时,降低焦平面温度对噪声的影响较小。

综上所述,随着焦平面温度降低,探测器的时间噪声、暗电流均会降低,且探测器的灵敏度会随之提升。但焦平面的温度还受到系统和制冷机功耗的约束,不能一直降低。在满足制冷机功耗的前提下,暗电流与光电流之比、暗电流噪声为在轨时红外焦平面温度选择的主要依据。

红外焦平面工作温度为 55K 时,三个波段的暗电流与光电流(黑体温度为 300K)的信号比例分别为 0.11(8-10.5 μm), 0.17(10.3-11.3 μm), 0.21(11.5-12.5 μm)。Landsat8 TIRS 探测器的设计暗电流与 300K 光电流的比例约为 0.19 (B10), 0.21 (B11), 即热像仪暗电流与 300K 光电流的比例与 Landsat8 TIRS 的比例相当。在辐射定标实验及在轨实验时,探测器的温度应小于等于 55K,根据实际的整机功耗决定探测器温度。

3.3 仪器杂散光仿真

仪器的杂散光分为内部杂散光和外部杂散光两部分。杂散光的存在会降低图像的对比度、信噪比以及定标精度等。

仪器内部杂散辐射产生的输出信号与组件的温度、发射率、光学路径等有关。不同光学、光机元件的工作温度、发射率、辐射传递路径不同。各组件产生的自身热辐射受到温度的影响也不同,采用仪器自身热辐射与 300K 信号的比值来表征仪器自身热辐射对成像性能的影响。

$$DN_{self-emission} / DN_{300K-signal} = f(T_{dewar}, T_{scan}, T_{optical}) \quad (3.6)$$

T_{dewar} , T_{scan} , T_{optics} 分别为杜瓦窗口、扫描镜、光学透镜的温度, $DN_{self-emission}$ 为自身热辐射的输出灰度值, $DN_{300K-signal}$ 为观测 300K 黑体时的输出灰度值。随着各组件温度的升高,自身热辐射增大,系统的辐射分辨率降低。因此,本节主要从扫描镜、透镜温度对仪器自身热辐射的影响分析,为系统成像性能的提升奠定基础。

3.3.1 仪器外部杂散光仿真

热红外波段遥感仪器在轨运行时,外部杂散光过大会影响图像质量和数据的量化反演精度。如 Himawari-8 AHI 经过分析发现太阳辐射经过多次反射后到达探测器像面,杂散光的辐亮度最大约为目标辐亮度的 12%。杂散光的存在增大了辐射定标误差,在有云场景下,反演的亮温差可达 8K^[127, 128]。此外,在轨初

期, Landsat 8 TIRS 波段 11 受杂散光的影响较大, 定标误差约为 $0.51\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}/\mu\text{m}$ (波段 10 的定标精度为 $0.29\text{W}/\text{m}^2/\text{sr}/\mu\text{m}$), 影响了遥感数据的定量化应用^[129]。

为了减少外部杂散光, 热像仪的遮光罩、光学系统和杜瓦在设计时进行了一系列的改进。遮光罩采用方形结构, 针对太阳角做两个方向的 20° 斜切, 避免太阳光直射遮光罩内部, 遮光罩采用铝蜂窝材质。在光学系统设计时采用了镜筒内壁涂黑, 台阶等微结构、附着在四块镜片的圆形挡光环(斜边), 镜 3 与镜 4 之间的椭圆挡光环(斜边)以及杜瓦内部的两级冷光阑等方案对视场外光线进行遮挡, 提高系统视场外的消光能力。

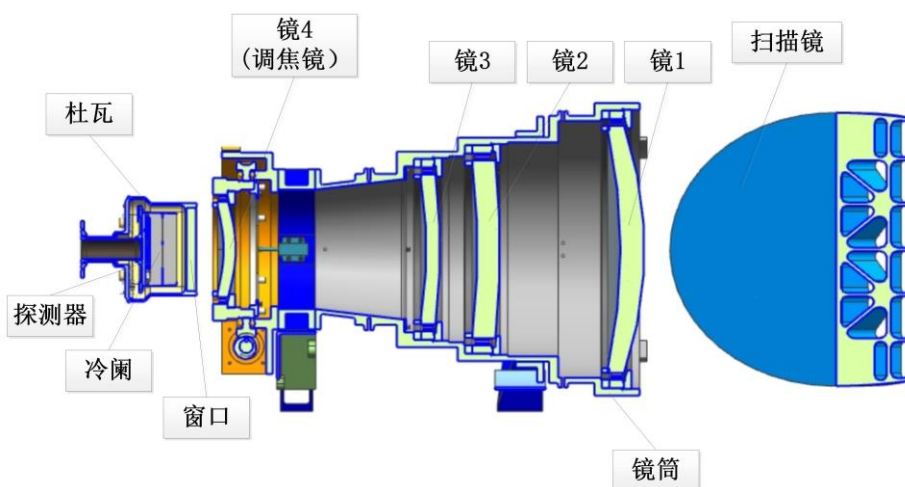


图 3.12 红外热像仪结构图

Figure 3.12 Infrared thermal imager structure diagram

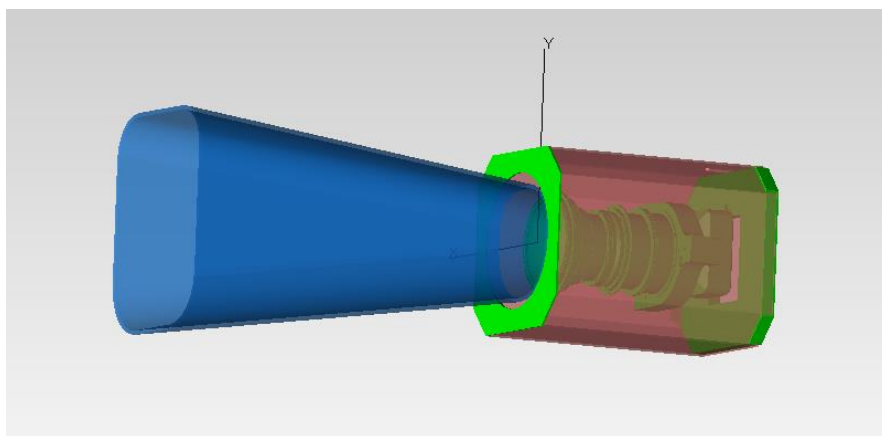


图 3.13 外遮光罩设计示意图

Figure 3.13 Schematic diagram of outer hood design

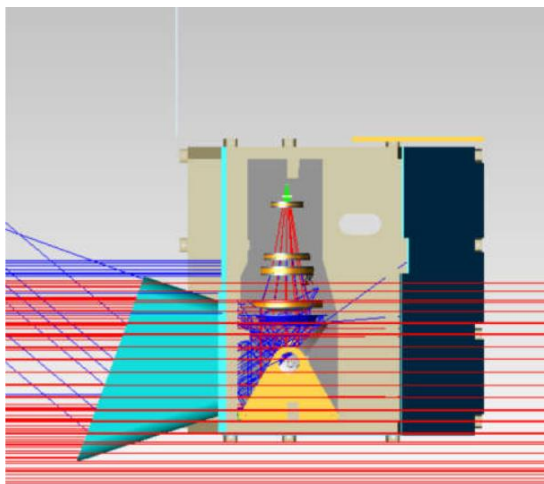


图 3.14 热像仪外部杂散光仿真模型

Figure 3.14 Simulation model of external stray light of thermal imager

Tracepro 是常用的光学仿真分析软件,功能包括照明系统设计、杂散辐射分析等,并可导入其他软件绘制的实物模型如 CAD。Tracepro 采用蒙特卡洛算法模拟光线的传播,采用大量的离散光线仿真得到像面的能量分布。Tracepro 在光线追踪时,需要设置光通量阈值。光线与物面接触后,会产生散射、透射和反射 3 种光线,当产生光线的能量小于光通量设置阈值后,将忽略不计^[130, 131]。

采用 tracepro 建立外部杂散光模型,模拟太阳光源,采用正向光线追迹的方法仿真得到太阳光到达探测器焦平面上的光线数量和辐照度。三个波段太阳光引起的杂散辐射与 300K 目标的比例与太阳离轴角的关系如下图所示:

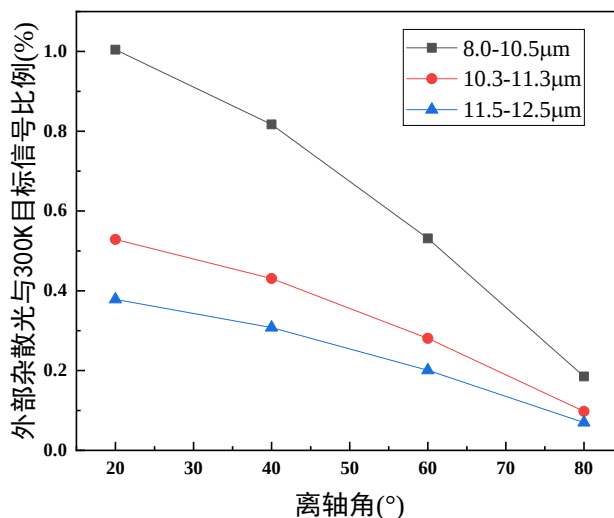


图 3.15 三个波段外部杂散光与 300K 目标比例与太阳离轴角的关系

Figure 3.15 The relationship between the proportion of external stray light in three bands to the target at 300K and the sun's off-axis Angle

外部杂散光与 300K 目标的比例随波长的增加而减小,在 8-10.5 μm 的宽谱段比例最大。计算结果表明,在目前的光机结构设计的基础上,外部杂散光达到像面的比例小于 300K 目标的 1.01%,不会产生严重的杂散信号,满足探测需求。

3.3.2 仪器内部自身热辐射仿真

由 2.2.4 节可知,内部杂散辐射是仪器输出信号中的一部分,特别是热红外探测系统,自身杂散辐射及稳定性不可忽略。仪器内部杂散辐射虽然可以通过观测冷空去除,但其在信号中占比过大会对降低信号可响应的动态范围,降低图像质量。

除了对仪器的优化设计外,对仪器温度场进行优化设计也可减小仪器的自身热辐射。本节通过 tracepro 仿真软件对各组件的自身热辐射在总的自身热辐射中的占比进行分析,为后续仪器的温度设计提供指导。

我们在 tracepro 软件中导入热像仪光学系统的立体模型,并将主要的元件(光学透镜、扫描镜、杜瓦窗口、镜筒内壁)设置为光源,追迹光线获得元件自身热辐射在像面上的能量分布。Tracepro 进行自身热辐射仿真的步骤包括:系统建模/导入、元件材料属性的设计、光学薄膜特性设计、光源的温度设计和光通量/辐照度分析^[132],表 3.4 中列出了在仿真分析时用到的参数。

图 3.16 中标注的标号为 1、2、3、4 的路径分别是透镜、镜筒、杜瓦窗口和扫描镜自身热辐射到达像面的路径。扫描镜、四个透镜和杜瓦窗口均位于光学系统的视场中,它们的自身热辐射主要经过光学系统的透射到达探测器像面,如图中的标号 1、3、4 光线所示。镜筒的自身热辐射不能直接到达探测器像面,通过反射到达像面,如图中标号 2 所示。各元件的杂散辐射与元件的温度、立体角、表面膜层的特性和达到像面经过的光学路径有关。在光学系统设计后,透镜的发射率、立体角以及辐射传输路径不能改变(不考虑光学元件辐射性能的衰减),影响系统自身热辐射的主要因素为各组件的温度。因此,各元件温度的合理设计是降低内部杂散辐射的重要途径。通过对不同温度场的仪器自身热辐射进行仿真,找到自身热辐射中占比最大的组件,为仪器的温度设计提供参考。

表 3.4 光学仿真分析中的光学元件参数

Table 3.4 Optical component parameters in optical simulation analysis

元件名称	反射率	折射率	吸收系数
扫描镜	0.97	/	0.03
透镜 1	0.02	0.95	0.03
透镜 2	0.02	0.95	0.03
透镜 3	0.02	0.95	0.03
透镜 4	0.02	0.95	0.03
杜瓦窗口	0.03	0.94	0.03

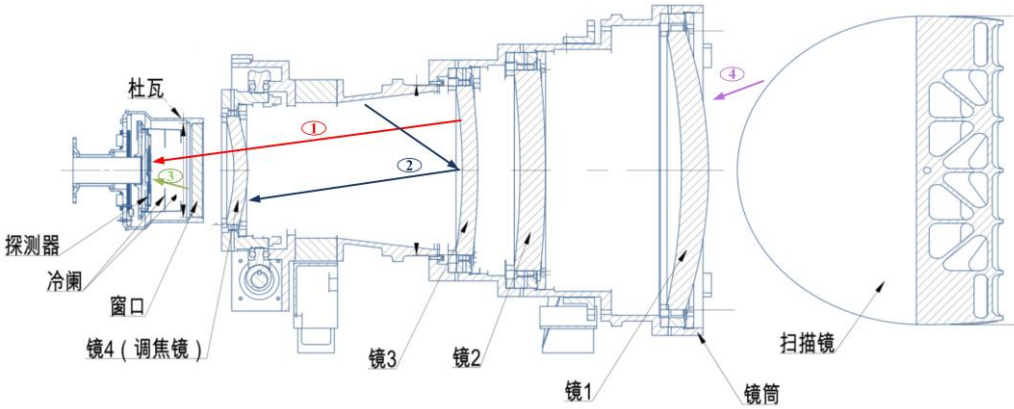


图 3.16 仪器自身辐射到达探测器的光路图

Figure 3.16 The light path diagram of the instrument's self-emission reaching the detector

Landsat 8 TIRS 的扫描镜温度范围为 273-293K，透镜温度为 186K。我们参考 Landsat8 的温度设计，设置仿真时所用的仪器温度场范围。在仿真时，忽略镜筒和透镜温度的差异，对不同仪器温度场的各组件仪器自身热辐射占比进行分析比较。

表 3.5 Tracepro 仿真仪器温度场设计

Table 3.5 Temperature of components in Tracepro simulation

温度 (K)	扫描镜	透镜	镜筒	窗口
温度场 1	300	195	195	205
温度场 2	270	195	195	205
温度场 3	270	205	205	205
温度场 4	300	205	205	205

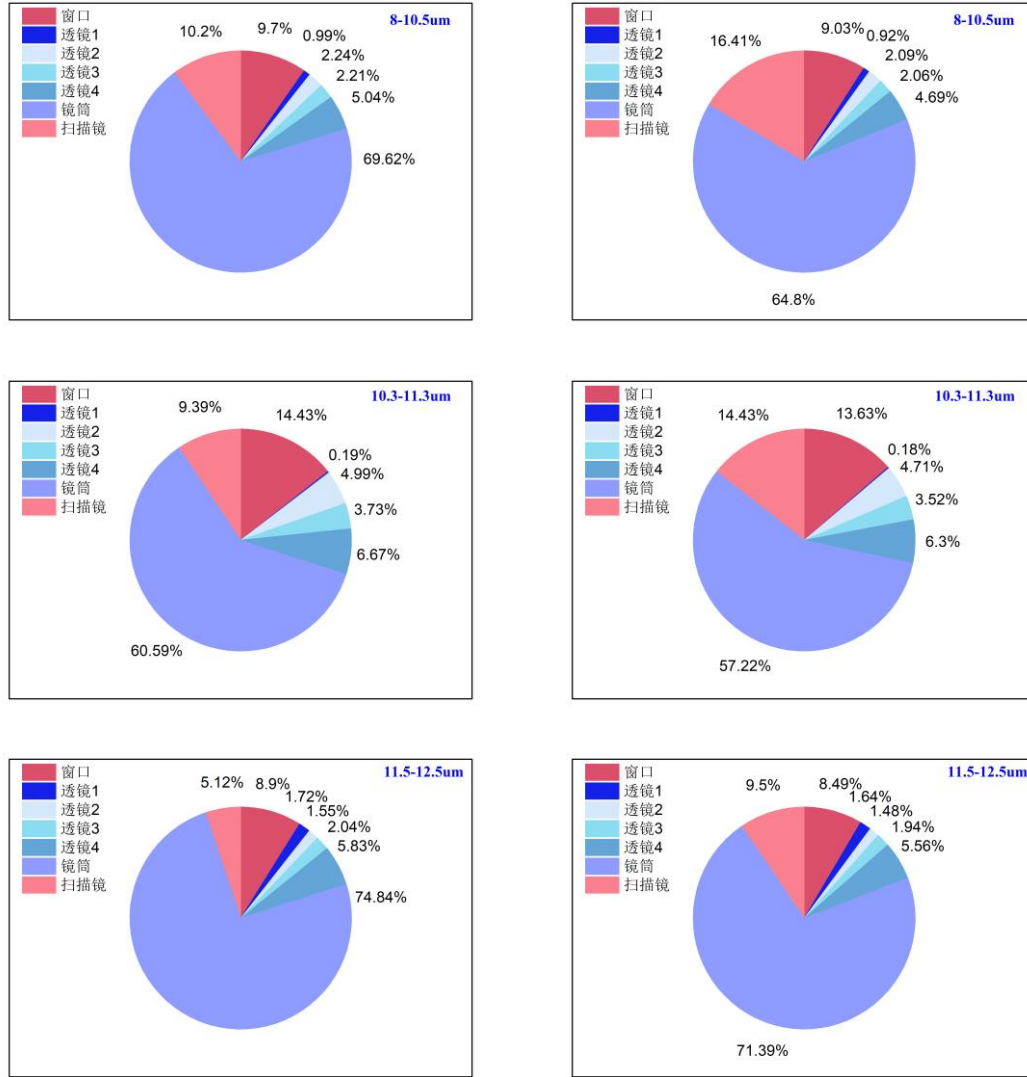


图 3.17 三个波段的各组件自身热辐射占比分析（光学透镜温度 195K，扫描镜温度，左：270K，右：300K）

Figure 3.17 Analysis of the proportion of self-emission of each component in the three bands (temperature field design: optical lens temperature 195K, scanning mirror temperature, left: 270K, right: 300K)

对于红外热像仪来说，由于镜筒的内壁进行了涂黑，发射率相较于透镜大很多，镜筒的自身热辐射占总的自身热辐射比例最大，且远大于 4 个透镜组的自身辐射。对于我们设计的 4 个温度场来说，镜筒自身热辐射的占比均大于 60%。不同组件改变相同温度时，改变透镜和镜筒温度对自身热辐射的影响最大（在仿真的 4 个温度场条件下）。扫描镜自身热辐射在总的自身热辐射中的占比随中心波长减小而减小。对比 10.3-11.3 μm 和 11.5-12.5 μm 的自身热辐射大小，11.5-12.5 μm 波段的自身热辐射更大。

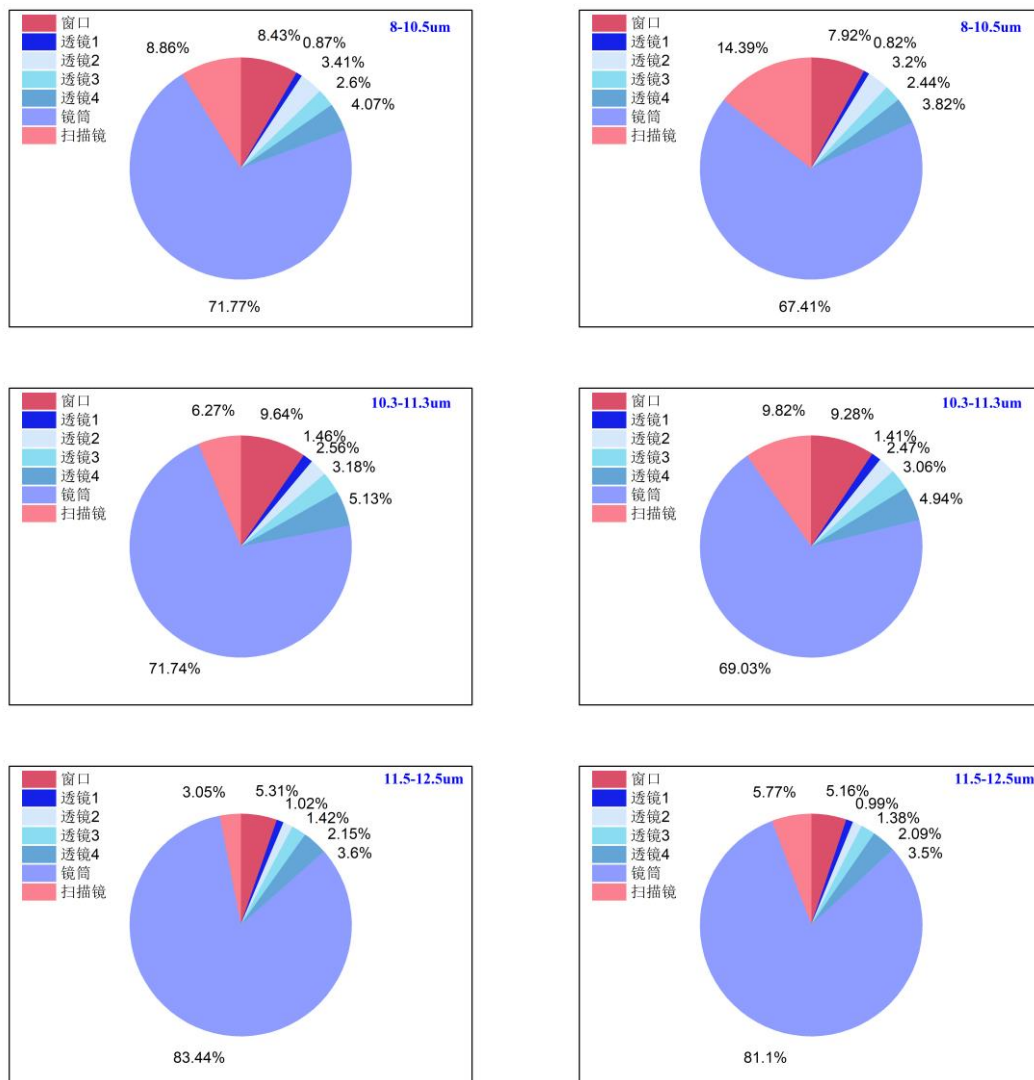


图 3.18 三个波段的各组件自身热辐射占比分析（光学透镜温度 205K，扫描镜温度，左：270K，右：300K）

Figure 3.18 Analysis of the proportion of self-emission of each component in the three bands (temperature field design: optical lens temperature 205K, scanning mirror temperature, left: 270K, right: 300K)

根据仿真结果可以得到以下结论：

- （1）镜筒的自身热辐射在自身热辐射中占比最大，且远大于其他组件的占比（仿真的 4 个温度场）。透镜温度和镜筒的温度具有关联性，降低透镜和镜筒的温度是可大大降低仪器自身热辐射。在轨运行时，镜筒和透镜的温度稳定性对背景响应的稳定性影响最大。
- （2）对于波段宽度相同的两个波段，11.5 μm -12.5 μm 总的自身热辐射大于波段 10.3 μm -11.3 μm 的自身热辐射。因此，对于工作在红外长波波

段的系统，自身热辐射的抑制尤为重要。

- (3) 降低热像仪系统内各组件温度是减小内部杂散辐射的途径之一，但不同组件温度控制所需要的功耗不同，仪器温度场的设计需要考虑系统功耗实际的测试结果。仪器温度场设计方案将在 3.3.3 和 3.3.4 中讨论。

3.4 热像仪温度场优化设计

3.4.1 透镜温度对背景响应的影响

光学透镜的温度不仅会影响其自身热辐射的大小，还会改变光学系统的焦距。因此，需要根据透镜工作温度与仪器背景响应的关系，选定在轨时光学透镜的温度。为了降低仪器背景响应的不稳定性对辐射定标的影响，光学透镜的控温精度要优于 $\pm 0.5\text{K}$ 。

为了探究透镜温度对仪器背景响应的影响，在实验中分别将光学透镜的温度设置为 185K 和 195K，扫描镜温度为 270K，其他组件的温度保持不变。将扫描镜指向冷屏，采集不同光学透镜温度下的输出数据。为了获取探测器的直流偏置，还需要采集多组积分时间的数据，并线性拟合积分时间与输出响应值的关系，截距即为直流偏置。将暗电流和直流偏置从冷屏观测的输出值中去除即可得到仪器背景响应产生的输出值。

$$DN_{self-emission} = DN_{back} - DN_{dark} - B \quad (3.7)$$

$$DN_{signal} = DN - DN_{back} \quad (3.8)$$

其中， $DN_{self-emission}$ 为仪器背景产生的探测器输出值， DN_{back} 为观测冷屏时的探测器输出， B 为直流偏置， DN_{dark} 为暗电流产生的探测器输出值。在对黑体观测时，根据式(3.8)计算黑体的输出响应值。 DN 为观测黑体时的探测器输出值， DN_{signal} 为由黑体产生的探测器输出值。

对于辐射特性相同的目标，探测器的三个波段接收到的辐射受到中心波长、波段宽度等的影响，不能仅利用仪器自身热辐射对应的输出值比较其对成像性能的影响。因此采用 $DN_{self-emission}/DN_{signal}$ 即背景响应与 300K 黑体信号的比例来衡量仪器背景对成像性能的影响。

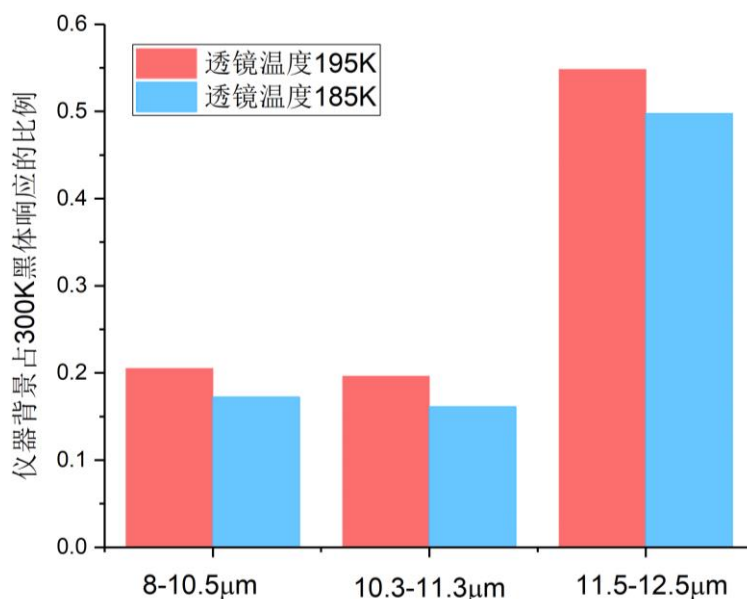


图 3.19 背景响应随透镜温度的变化

Figure 3.19 Background response changes with temperature of lens

图 3.19 中显示了热像仪的光学透镜在 185K 和 195K 时,三个波段的仪器背景与 300K 黑体响应的比例。透镜温度从 185K 升温到 195K 时,三个波段的仪器背景与 300K 目标的输出的比例分别从 0.178 增大到 0.214, 0.167 增大到 0.204, 0.502 增大到 0.563。对于 8 μm -10.5 μm , 10.3 μm -11.3 μm 波段,该比例均小于 0.22。对于 11.5 μm -12.5 μm 波段,仪器背景与 300K 目标的输出值之比最大,且大于其余两个波段的 2 倍,即仪器背景响应与波长有关,且随波长的增大而增大。对于 Landsat8 TIRS,长波 11.5-12.5 μm 波段的仪器背景比例也远大于 10.3-11.3 μm 的仪器背景比例。

3.4.2 扫描镜温度对背景响应的影响

除了光学透镜的自身热辐射外,扫描镜的自身热辐射也是背景响应的来源之一。扫描镜位于光学透镜前,通过扫描机构控制扫描镜的角度,实现对冷空、黑体和地物的成像。扫描镜的自身热辐射经过光学透镜、杜瓦窗口后到达红外焦平面。由于光学路径、发射率、所处温度区间的差异,扫描镜和光学透镜改变同样大小的温度,仪器背景响应值改变的大小不同。为了选取仪器的最佳工作温度点,设置了扫描镜和光学透镜的温度网格,分别在透镜温度为 185K 和 195K 时,扫描镜的温度分别为 264K, 270K 和 277K 的条件下,统计观测冷屏的输出灰度值。

表 3.6 透镜温度为 185K 时, 仪器背景比例随扫描镜温度的变化

Table 3.6 Background ratio of the instrument as a function of the temperature of scan mirror(Temperature of lens: 185K)

扫描镜温度	8-10.5 μm	10.3-11.3 μm	11.5-12.5 μm
264K	0.172	0.161	0.497
270K	0.178	0.167	0.502
277.5K	0.187	0.174	0.512

表 3.7 透镜温度为 195K 时, 仪器背景比例随扫描镜温度的变化

Table 3.7 Background ratio of the instrument as a function of the temperature of scan mirror(Temperature of lens: 195K)

扫描镜温度	8-10.5 μm	10.3-11.3 μm	11.5-12.5 μm
264K	0.205	0.196	0.548
270K	0.214	0.204	0.563

从上表可以看出, 透镜温度为 195K、扫描镜温度为 264K 时, 仪器背景的比例仍大于透镜温度为 185K、扫描镜温度为 277.5K 时的比例。即扫描镜和透镜变化同样的温度时, 光学透镜、光机机构的自身热辐射对应的探测器输出变化更大, 这个测试结果与 3.3 节中的实测结果一致。

3.4.3 多参数联合优化设计

从仪器自身热辐射的公式来看, 降低探测器、扫描镜、透镜和杜瓦窗口的温度均能提升仪器的动态范围。但热红外成像是复杂的热、光、机的综合系统, 且 CASEarth 为小卫星, 体积、重量和功耗都受到限制。

热红外成像仪的热源主要有制冷机、制冷机电控箱、综合电箱、探测器头部电路盒、前放盒、扫描电箱。红外焦平面、杜瓦窗口的温度由制冷机通过机械制冷方式制冷, 其温度主要受到制冷机功率的限制。扫描镜、透镜温度依靠辐射制冷方式制冷, 温度的设置受到温控功耗的限制。光学透镜的工作温度约为 200K 以下, 仅靠辐射制冷无法满足光学组件的温度要求, 因此在设计中加入了地球屏组件来遮挡地球辐射的外热流。

热像仪的散热结构也是温度控制的重要部分, 散热板将内部热量散到太空中, 在相机内部通过等温化设计获得相对均匀的温度场分布, 如图 3.20 所示。

包括电箱散热板、黑体散热板、制冷机散热板、冷箱散热板、光学散热板探测器头部电路盒散热板。

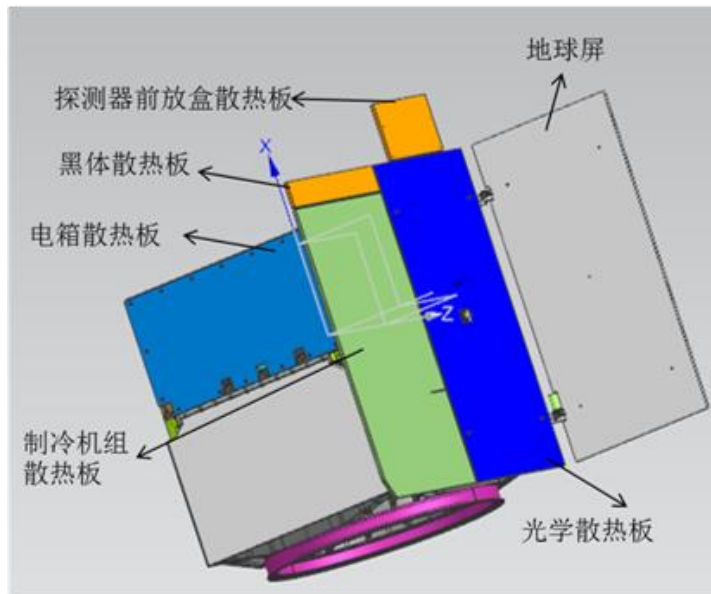


图 3.20 热像仪的散热结构

Figure 3.20 Heat dissipation structure of TIRI

仪器背景响应是各组件温度的函数，且随组件温度的升高而增大。由于各组件温度受到系统功耗及散热板的限制，各组件温度的设定需要在满足系统最大功耗下，使仪器的灵敏度达到最优。热像仪系统的温控和制冷机功耗的约束条件如(3.12)所示。

$$DN_{background} = f(T_{optics}, T_{scan-mirror}, T_{dewar}, T_{focal-plane}) \quad (3.9)$$

$$z_1 = \min(DN_{background} / DN_{BB-300K}) \quad (3.10)$$

$$z_2 = \min(NE\delta T) \quad (3.11)$$

$$\begin{cases} P_{Thermal\ control} < 50W \\ P_{refrigerator} \leq 150W \end{cases} \quad (3.12)$$

Landsat8 TIRS 为陆地资源探测提供了有效的遥感数据，仪器的灵敏度均达到国际热红外波段的领先水平。由于热像仪的设计与 Landsat8 的 TIRS 十分相似，将 Landsat 8 背景响应与 300K 信号比例作为设定在轨仪器温度的设计标准，并结合实际功耗对温度场进行设计。

根据不同温度场的背景响应分析，光学透镜和光机结构自身热辐射中占比最大。光学透镜及镜筒的温度设置受到热控功耗的限制。综合实际测试的功耗以及热像仪的自身热辐射与 300K 目标信号的比例，因此选择透镜温度和扫描镜温度

分别为 195K 和 270K。

Landsat8 TIRS 光学透镜的工作温度为 186K，温度稳定性为 $\pm 0.25\text{K}$ （44 分钟内），采用加热元件和被动散热的方式达到透镜的设计温度。扫描镜的工作温度为 273-293K，温度稳定性为 $\pm 2\text{K}$ （44 分钟内）^[64]。仪器自身热辐射的输出灰度值约占 300K 目标输出灰度值的比例分别为 0.20(B10)，0.53(B11)，暗电流占 300K 目标输出灰度值的比例为 0.21(B10)，0.19(B11)。根据 3.2 的实验结果以及制冷机的功耗限制，探测器工作温度设置为 52K。表 3.8 比较了热像仪和 TIRS 的主要温度及功耗参数。

表 3.8 热像仪与 TIRS 的温度参数比较

Table 3.8 Comparison of temperature parameters between thermal imager and TIRS

组件名称	Landsat8 TIRS	CASEarth 热像仪
光学透镜	186K	195K
扫描镜	273K-293K	270K
红外焦平面	44K	52K

3.4.4 热像仪成像性能分析

热像仪要求的探测动态范围为 220-340K，在系统各组件的温度确定后，以观测 340K 黑体时，使得探测器输出 DN 输出值尽可能大且未饱和作为积分电容的选择依据。在选定的仪器工作温度下进行实验，依据设定积分时间选择合适的积分电容。分别采集冷屏和黑体的观测计算成像性能的参数，包括背景与信号的比例、暗电流与信号的比例和噪声等效温差。

表 3.9 热像仪与 Landsat8 TIRS 的仪器背景比例分析

Table 3.9 Instrument background ratio between thermal imager and Landsat8 TIRS

波段	热像仪	TIRS
8-10.5 μm	0.214	/
10.3-11.3 μm	0.204	0.200
11.5-12.5 μm	0.563	0.533

在选定的仪器温度下，热像仪的背景响应与的比例和 Landsat8 TIRS 相当，为大动态范围成像以及高灵敏度成像奠定基础。

3.5 本章小结

本章主要对热像仪的多温度参数进行了联合优化设计,为提升仪器的灵敏度和定标精度奠定基础。首先,在真空低温环境下开展了探测器组件级实验,通过对杜瓦窗口的自身热辐射的仿真,实现了探测器输出中杜瓦窗口自身热辐射和暗电流的分离,并计算了不同焦平面温度的暗电流。实验结果表明,焦平面温度为 60K 时,暗电流约为 55K 时的 5 倍;且探测器的噪声也随焦平面温度的降低而降低。在红外焦平面温度 55K 时,暗电流与 300K 目标信号的比例约为 0.11(8-10.5 μm), 0.17(10.3-11.3 μm), 0.21(11.5-12.5 μm),与 Landsat 8 的比例相当。最终,探测器工作温度依据功耗设置为 52K。其次,建立了 tracepro 仿真模型,对外部和仪器内部杂散辐射进行了仿真。Tracepro 仿真结果表明外部杂散光与 300K 目标之比小于 1.01%,满足探测需求。对于内部杂散辐射,光学透镜、镜筒、扫描镜以及杜瓦窗口的温度均是影响其大小的因素。在多温度场下对仪器自身热辐射进行了仿真,仿真结果表明透镜和镜筒的光机结构在自身热辐射中占比最大。依据仿真结果设计了仪器温度网格实验,结合系统散热、制冷功耗,对仪器温度场、积分电容、积分时间、光学口径等参数联合寻优。最终,光学透镜、扫描镜的温度分别设置为 195K, 270K,仪器背景与 300K 目标的比例在三个波段分别为 0.214、0.204、0.563,达到了与 Landsat 8 TIRS 相当的水平。

第4章 热像仪低频高效辐射定标方法研究

第三章根据 tracepro 仿真结果以及实测数据对热像仪扫描镜、光学透镜和红外焦平面的温度等参数进行了优化设计,在工程约束的范围内实现了热像仪的高灵敏探测。本章针对相对光谱响应函数非均匀性、面源黑体温度的非均匀性、背景响应低频次更新等影响辐射定标精度的问题,建立了测量和分析方法。

为了提升 4 级 TDI 探测器的灵敏度,提出了一种基于多温度点遍历的 TDI 像元选择方法;在实验室真空低温环境下开展了辐射定标实验,解算了实验室辐射定标系数,并采用了蒙特卡洛模拟法对热像仪定标不确定度进行了评估,为在轨定标提供了基础。

在轨定标时,长线列摆扫热像仪需通过卫星侧摆观测冷空实现背景响应的去除,频繁对冷空观测会缩短仪器的有效观测时间,因此如何设计定标频次以及在低频定标条件如何保证定标精度是热像仪在轨定标需要解决的问题。本章提出了基于随机森林的高频次背景响应更新方法,建立了基于仪器稳定性评估的低频次高效定标模型,验证了模型的精度。此外,对热像仪的月球、恒星的观测能力进行评估,在轨定标方案中引入红外恒星、月球作为交叉辐射定标校验源,并在其他卫星上对该方法进行了验证。

4.1 实验室辐射定标

4.1.1 实验室定标实验设计

热像仪的光学系统设计的工作温度为 195K,常温下无法满足光学系统的温度要求,且在常温下仪器的自身辐射较大,造成仪器灵敏度低,无法模拟热像仪在轨的成像性能。因此,实验室辐射定标时将热像仪系统置于真空罐内测试。实验室定标不仅计算确定辐射定标的系数,也会对热像仪的辐射定标性能测试包括光谱响应特性、探测器响应特性、噪声特性等。

实验室定标系统包括扫描机构、定标黑体组件、低温光学系统、焦平面组件、信息获取电箱、制冷机组件、综合控制电箱等。信息获取电箱实现在定标模式下对探测器图像的采集分析。综合控制电箱控制扫描机构的运动、系统内各组件在设定的目标温度下工作,完成指令发送、遥测显示等功能。实验室定标系统结构

如图 4.1 所示。

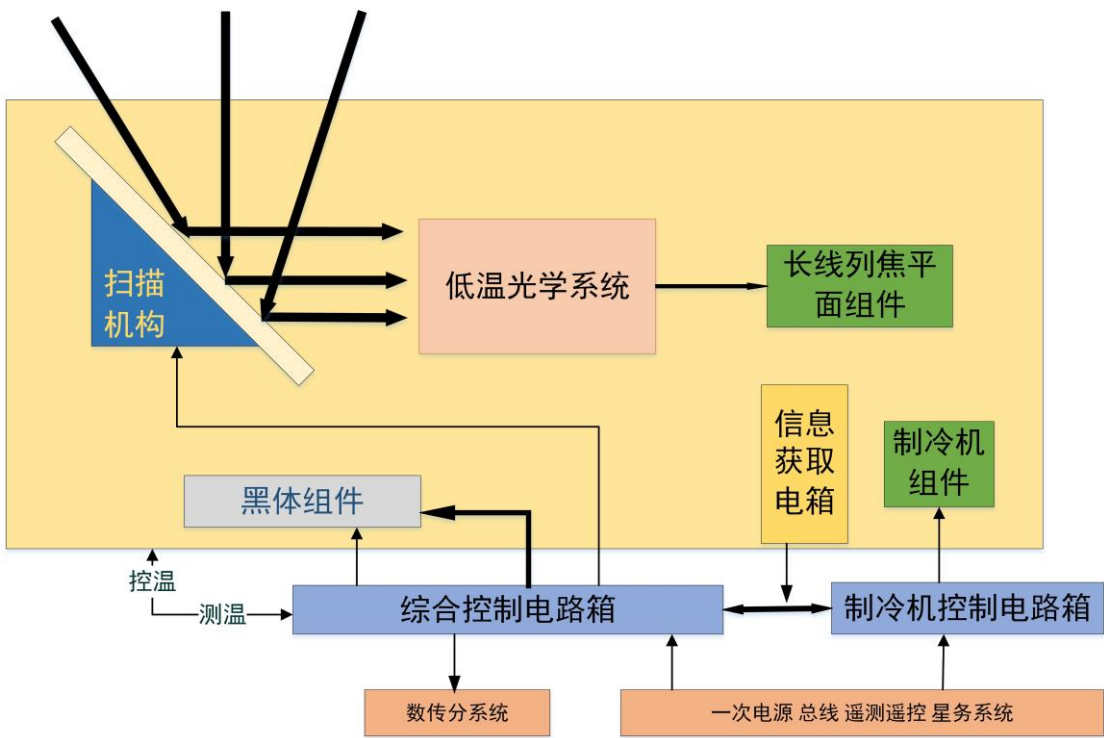


图 4.1 定标系统结构示意图

Figure 4.1 Schematic diagram of the calibration system

热像仪搭载的全口径覆盖的温度可调的面源黑体和冷空为在轨运行时的主要定标源。在轨时，扫描机构控制前置扫描镜的角度对冷屏、黑体、地球场景三个视场进行切换。实验室定标时，利用 100K 的冷屏模拟冷空，通过对其观测去除仪器背景响应对定标的影响。扫描机构控制前置扫描镜的角度实现冷屏与黑体的切换。

辐射定标实验通过改变黑体的温度来改变入瞳处的辐亮度，根据冷屏和黑体的观测数据，获取辐亮度与响应灰度值之间的关系，给出实验室辐射定标系数和精度。实验室辐射定标系数、精度的计算也可在轨辐射定标提供参考。为了获取热像仪在整个探测范围内的响应特性，设置星上黑体和地面黑体作为定标源进行定标。由于星上黑体的温度会影响到仪器温度场的稳定性，星上黑体的最高温度设置为 310K。定标温度点及对应的黑体温度非均匀性如图 4.2 所示。当黑体升温至定标温度点，且温度稳定后，采集该温度点下的热像仪三个波段的探测器输出值。

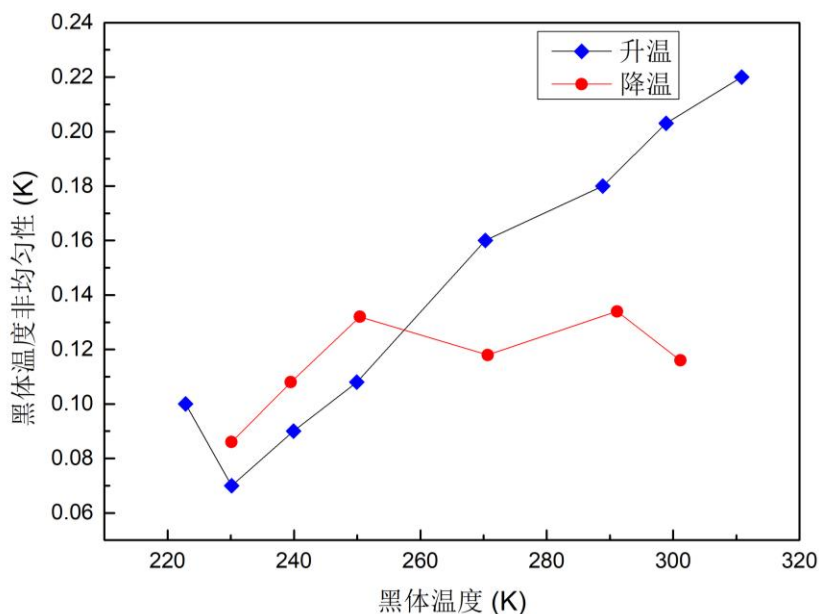


图 4.2 定标测试的黑体温度及非均匀性

Figure 4.2 Temperature and non-uniformity of blackbody for calibration test

4.1.2 4 级 TDI 最佳像元组合筛选方法研究

热像仪采用摆扫的成像方式，像元的驻留时间短，采用 4 级 TDI 成像方式提升仪器的灵敏度。TDI 通常的做法是将按照国标法将像面的盲元去除后，累加单列 4 像元的信号。单列的 4 个像元，由于材料等的差异，其响应、暗电流和噪声等特性均存在一定的差异，在 TDI 计算时，部分响应特性较差的像元累加后并不能提升整列像元的灵敏度。因此，我们提出了一种基于多温度点遍历的 4 级 TDI 最佳像元选择方法进一步提升灵敏度。

将多温度点的定标数据作为输入，构建像元选择矩阵，对 6144 列的像元分别迭代求出信噪比最大的组合并输出像元选择矩阵，图 4.3 为利用单个温度点数据计算单列像元的选择矩阵流程。

具体方法如下：对一列像元进行计算时，设置初始最大信噪比，去除盲元后依次将第 k 个像元的多帧响应值与前 $k-1$ 个像元的多帧响应值累加计算信噪比，并与最大信噪比进行比较；如果该组合下信噪比大于最大信噪比，将该信噪比记为最大信噪比，并将像元选择矩阵中的该像元对应位置标记为 0，直到该列像元循环结束。对三个温度点的定标数据重复该操作，得到三个像元选择矩阵。将三个像元选择矩阵求或操作，得到最终的 4 级 TDI 像元选择矩阵。

表 4.1 列出了使用传统 TDI 以及基于多温度点遍历的 4 级 TDI 最佳像元组

合计算方法的 NEdT 计算结果，结果表明在三个波段下，NEdT（300K）分别能减小 13.14%，7.30%，9.36%。

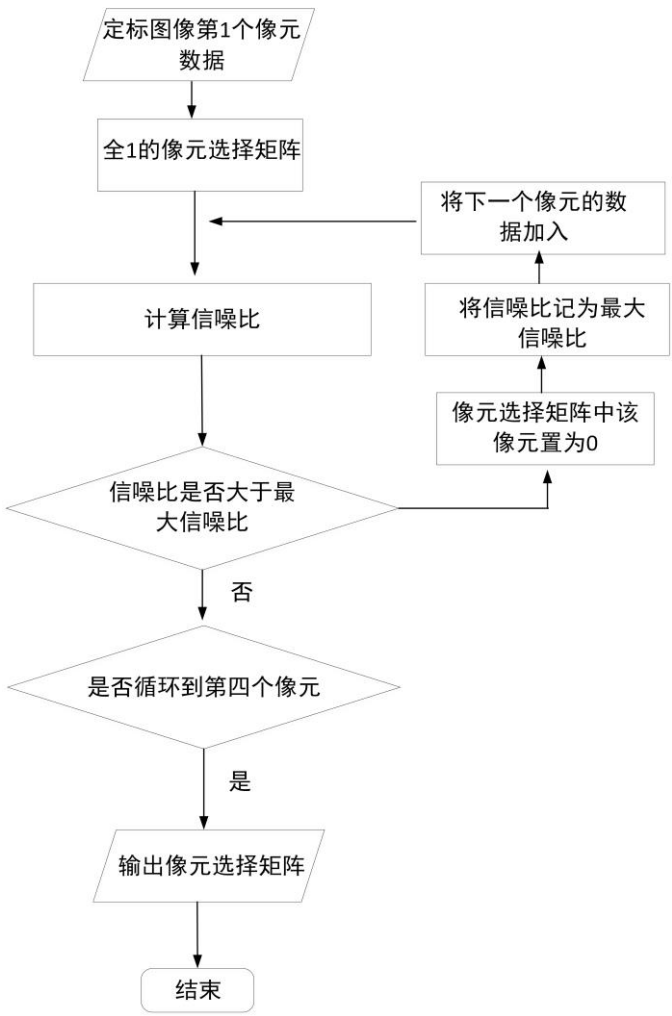


图 4.3 TDI 最佳像元组合筛选方法

Figure 4.3 TDI Best Pixels selection method

表 4.1 传统方法与遍历法 TDI 后的 NEdT 比较

Table 4.1 Comparison of NEdT between traditional method and proposed method

NEdT (K)	B1	B2	B3
	(11.5-12.5μm)	(8-10.5μm)	(10.3-11.3μm)
传统方法	0.0875	0.0370	0.0521
遍历法	0.0760	0.0343	0.0472
NEdT 减小 (%)	13.14	7.30	9.36

图 4.4 为三波段的像元噪声等效温差的分布，三个波段的 NEdT 均优于 0.08K，其中 8-10.5um 的 NEdT 最小，仅为 0.037K，为热像仪数据的量化应用奠定基础（该结果为高灵敏度成像方式）。

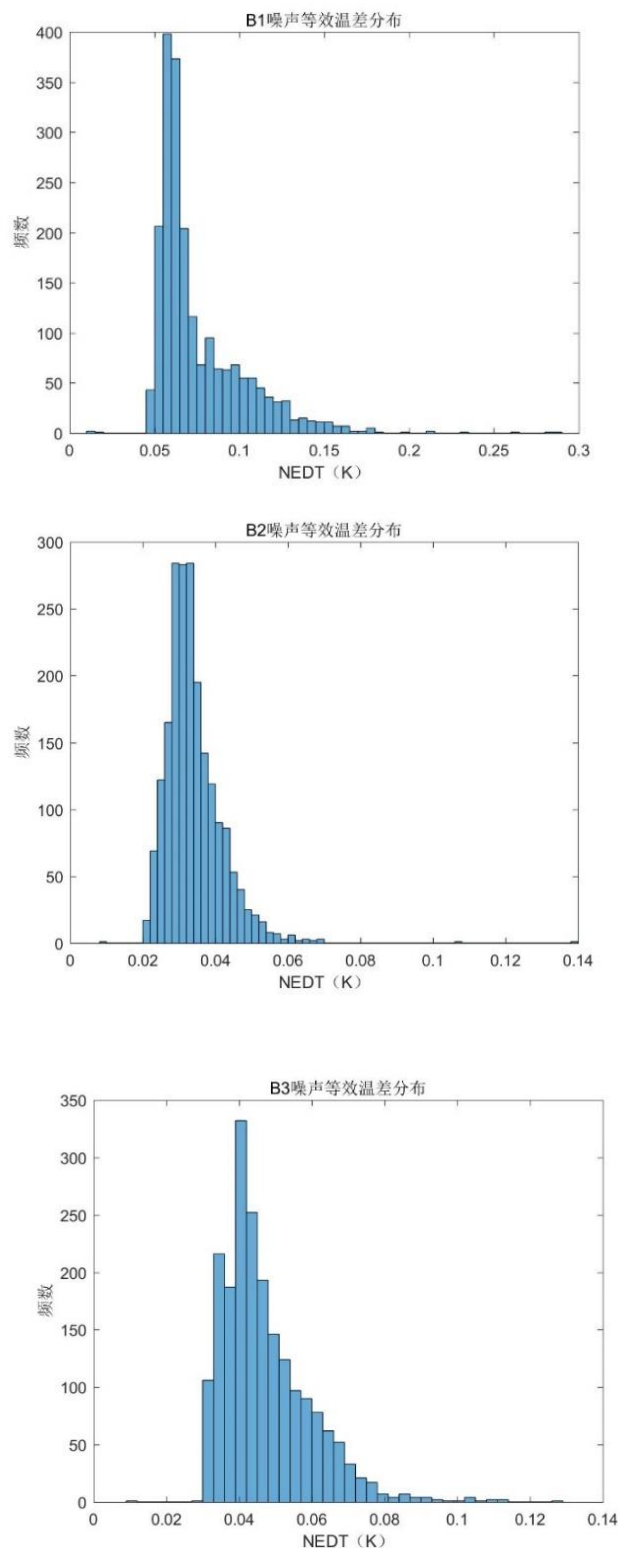


图 4.4 三波段像元的噪声等效温差分布

Figure 4.4 NEDT distribution of three - band pixels

4.1.3 定标数据预处理方法

探测器由于制作工艺、材料、读出电路等的原因,不同像元间的响应存在一

定的差异，探测器中存在少量无效像元，这些均影响了图像的质量、辐射定标计算、定量化应用。探测器原始的输出数据到辐射定标计算前需要进行一系列的处理，包括饱和像元替换、4 级 TDI 和非均匀校正等步骤。从探测器输出的原始数据到预处理后的定标数据的处理流程如下：

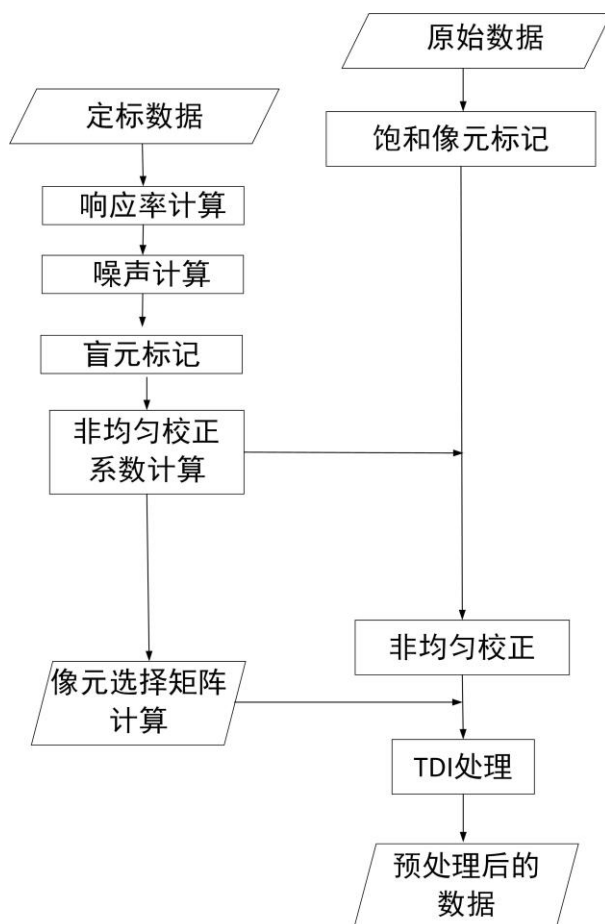


图 4.5 探测器原始数据的预处理流程

Figure 4.5 The preprocessing process of the detector's raw data

下面具体介绍饱和像元以及非均匀校正的处理方法：

（1）饱和像元标记与替换

在对目标观测时，部分像元的响应率过大造成像元输出的灰度值比其他像元更容易饱和。在辐亮度较小时，该部分像元为正常像元，能反应出目标真实的辐亮度。在目标辐亮度增大时，响应率较大的像元更容易饱和，变为无效像元。这些像元影响了像面的完整性，且其灰度值不能准确的反演出目标的信息。从盲元的定义来看，像元的响应率过大并不能作为盲元的判定标准。因此，经过盲元替换和非均匀校正步骤后，这部分像元的灰度值仍然为饱和值。在非均匀校正前，将像面上的饱和像元标记。当探测器对均匀场景观测时，盲元的灰度值可用像面

的平均响应值替代。当探测器对非均匀场景观测时,利用像面上相邻像元的灰度值替代或利用如基于局部梯度统计特性、自适应回归盲元补偿算法等进行替换[133, 134]。

(2) 非均匀性校正

探测器的非均匀性的主要来源包括暗电流非均匀性、像元量子效率的差异、制作工艺差异、读出电路中不同列放大器的差异以及信息获取通道的差异等。探测器对均匀辐亮度的目标成像时,探测器像面上各像元输出的灰度值存在差异,图像产生条纹,影响了图像质量如物体边缘和细节信息及后续的目标能量反演、单帧目标检测等应用[135, 136]。

探测器的非均匀性也称空间噪声,国标中对非均匀性的定义为像面上有效像元响应率的均方根与平均响应率的比值。实际计算时,常用像面上有效像元输出灰度值的方差与均值表示,如式(4.1)所示。

$$NUC = 100\% \cdot \frac{1}{DN} \sqrt{\frac{1}{(m \times n - d)} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n (DN(i, j) - \overline{DN})^2} \quad (4.1)$$

m 为探测器像元的行数, n 为像元的列数, d 为无效像元的个数, $\overline{DN}$ 为去除无效像元后的平均响应输出值。常用的非均匀校正方法可分为基于定标和基于场景的校正方法。基于场景的非均匀校正方法不需要利用外部定标源的图像进行校正,常用的方法有恒定统计法、kalman 滤波法和神经网络方法等[137-139]。基于定标的方法需要采集定标源的数据作为非均匀校正后输出的参考值,其优点是算法简单[140-142]。

基于定标的非均匀校正可分为单点法、两点法和多点法校正。单点法仅利用在单个入射辐亮度的探测器响应数据计算非均匀校正系数,通常根据系统的动态范围选择典型的辐亮度计算校正系数。单点法的校正步骤是求出像面的平均输出值,单个像元的输出值与平均输出值的差值为校正偏移量。像面上不同像元的响应率和直流偏置均存在非均匀性。单点法的校正公式如式(4.2)、(4.3)所示。单点法的非均匀校正仅对单个像元偏置非均匀性进行校正。因此,当入射辐亮度变化时,特别是大动态范围的探测数据,单点法计算的非均匀校正系数不再适用。单点法的非均匀校正前后的结果如图 4.6 所示。

$$\Delta DN(L_{\text{typical}})_{i,j} = DN(L_{\text{typical}})_{i,j} - \overline{DN(L_{\text{typical}})} \quad (4.2)$$

$$DN(L)'_{i,j} = DN(L)_{i,j} - \Delta DN(L)_{i,j} \quad (4.3)$$

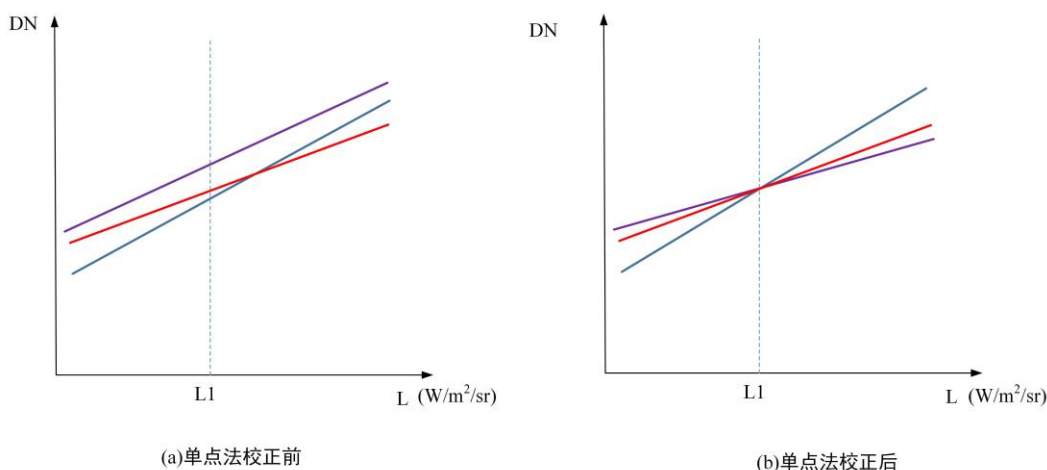


图 4.6 单点法非均匀校正示意图

Figure 4.6 Schematic diagram of single-point nonuniformity correction

基于两点法的非均匀校正是在探测器的响应为线性的基础上进行的,可对偏置的非均匀性和增益的非均匀性进行校正,是工程中常用的非均匀校正方法。非均匀校正系数是根据探测器各像元在两个不同入射辐亮度下的响应输出值计算的。在实验室定标时,可通过改变黑体的温度,获取两个辐亮度下的探测器响应输出值并计算得到非均匀校正系数。

两点法的非均匀系数的计算公式如下:

$$K_{i,j} = \frac{\overline{DN(T1)} - \overline{DN(T2)}}{DN_{i,j}(T1) - DN_{i,j}(T2)} \quad (4.4)$$

$$B_{i,j} = \overline{DN(T1)} - DN_{i,j}(T1) * K_{i,j} \quad (4.5)$$

$$DN'_{i,j} = DN_{i,j} * K_{i,j} + B_{i,j} \quad (4.6)$$

$DN_{i,j}(T1)$ 和 $DN_{i,j}(T2)$ 分别为在黑体温度为 $T1$ 和 $T2$ 时,坐标为 (i,j) 的像元的输出灰度值。 $\overline{DN(T1)}, \overline{DN(T2)}$ 分别为在黑体温度 $T1$ 和 $T2$ 下的探测器输出的平均值(去除盲元)。 $K_{i,j}$, $B_{i,j}$ 为像元的非均匀校正系数。将非均匀校正系数应用到单个像元输出的灰度值获取校正后的灰度值,具体计算方法如式(4.6)所示。对于在动态范围内呈线性响应的探测器,两点法非均匀校正一般能获得较好的校正效果,如图 4.7 所示。

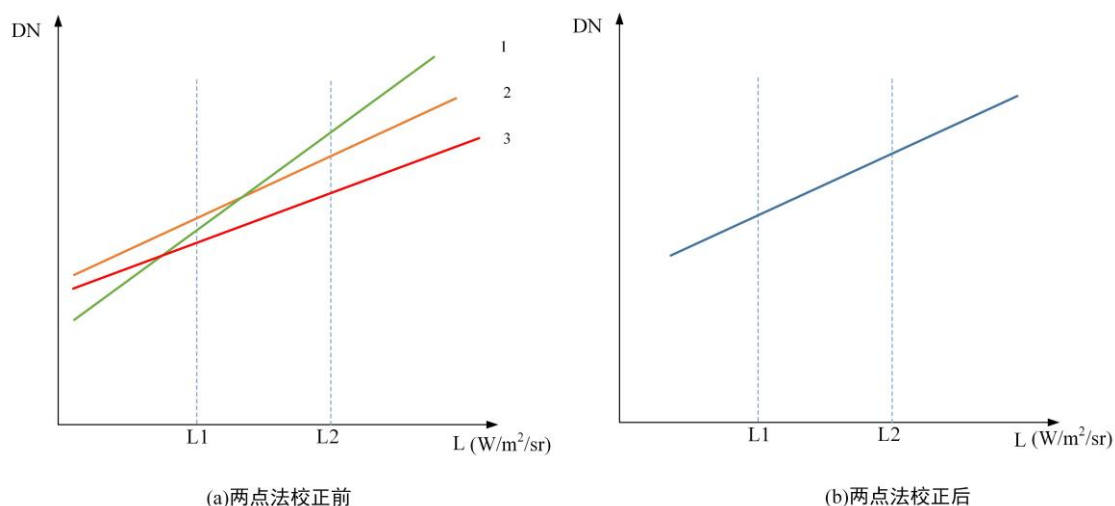


图 4.7 两点法非均匀校正示意图

Figure 4.7 Schematic diagram of two-point nonuniformity correction

多点法的非均匀校正适用于响应为非线性的红外探测器，多点法的校正可分为多种，常用的方法是将响应区间分为多段分别采用两点法校正以减小非线性响应带来的非均匀校正后的残差。

热像仪在发射前定标试验中，采用基于定标的方法进行非均匀校正。热像仪采用的探测器为四个模块拼接长行列探测器，由于四个模块的像元响应存在一定的差异，采用单个模块分别校正的方法，即单个模块分别计算非均匀校正参数。式 4.4 中的响应平均值由式 4.7 计算， m 为单个模块的行数， n 为单个模块的列数， d 为盲元数量，像元均值是去除盲元后计算得到的。热像仪采用两点法定标即可满足非均匀性的要求，校正后的非均匀性如表 4.2 所示。

$$\overline{DN} = \frac{1}{m \times n - d} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n DN_{i,j} \quad (4.7)$$

表 4.2 非均匀校正结果

Table 4.2 Non-uniformity correction results

非均匀性%	M1	M2	M3	M4
B1	0.50	0.36	0.36	0.51
B2	1.60	0.59	0.79	1.05
B3	1.17	0.44	0.55	0.55

4.1.4 相对光谱响应的非均匀性

探测器的相对光谱响应是计算辐亮度的重要参数。光谱响应定标通常在实验室条件下进行,受到光谱响应测试仪器等的限制,在轨对宽波段探测器进行光谱响应定标很难。在对均匀目标成像时,像元间光谱响应的差异使得像面接收到的辐亮度不同,图像产生条纹,对后续图像量化应用如海面温度反演等产生影响[143, 144]。

为了评估像元间光谱响应的非均匀性对探测器接收到的辐亮度的影响,我们对热像仪探测器单个像元的相对光谱响应进行了测试,并根据像面接收到的黑体辐亮度公式,计算光谱响应非均匀性引入的辐亮度差异。单个像元的辐亮度与像面的平均辐亮度的差异用公式表示:

$$\Delta L_i = 100\% \times \frac{\int SRF_i(\lambda) L_{\text{planck}}(\lambda) d\lambda - \int \overline{SRF}(\lambda) L_{\text{planck}}(\lambda) d\lambda}{\int \overline{SRF}(\lambda) L_{\text{planck}}(\lambda) d\lambda} \quad (4.8)$$

其中, ΔL_i 为第 i 个像元的辐亮度与像面平均辐亮度的差异, $SRF_i(\lambda)$ 为第 i 个像元的光谱响应曲线, $\overline{SRF}(\lambda)$ 为单个模块内的平均光谱响应曲线, L_{planck} 为根据普朗克公式计算的黑体辐亮度。由于光谱响应的非均匀性造成的辐亮度非均匀性如表 4.3 所示。

我们在三个典型黑体温度 270K, 300K, 330K, 分别比较了由于光谱响应的非均匀性引入的辐亮度差异。在黑体温度为 300K 时, 光谱非均匀性在三个波段引入的辐亮度非均匀性小于 1.3%、0.7%和 0.74%。Landsat 9 的光谱响应的非均匀性在两个波段引入的辐亮度非均匀性小于 0.8%和 0.3%^[66]。辐亮度的非均匀性对定标的影响较小, 使用平均光谱响应可满足定标要求, 因此在辐射定标计算时使用平均光谱响应曲线对黑体辐亮度计算, 探测器的平均光谱响应曲线如图 4.8 所示。

表 4.3 不同光谱响应曲线的辐亮度非均匀性

Table 4.3 The radiance non-uniformity of different spectral response curves

波段	辐亮度非均匀性		
	230K	300K	330K
8-10.5	1.106%	1.178%	1.238%
10.3-11.3	0.699%	0.697%	0.695%
11.5-12.5	0.744%	0.740%	0.736%

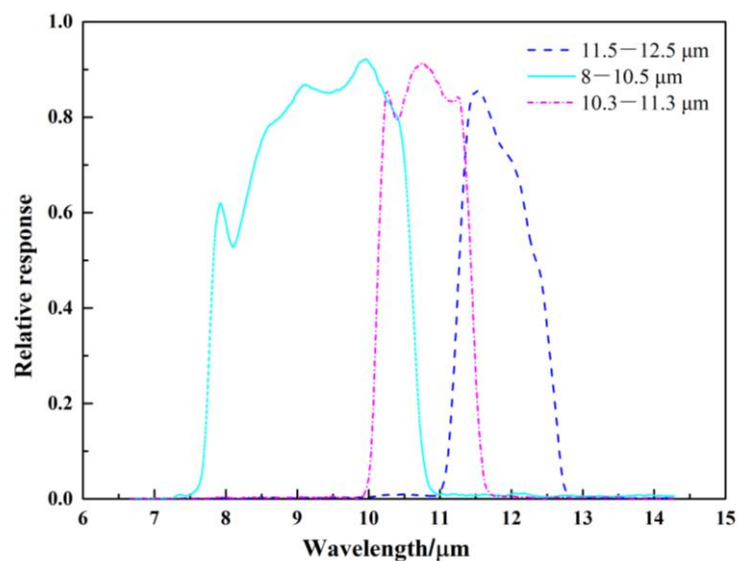


图 4.8 热像仪探测器三谱段光谱响应曲线

Figure 4.8 The spectral response curve of the three bands of the thermal imager

4.1.5 黑体性能参数

热像仪的黑体置于扫描镜前,可实现全光路的星上辐射定标。黑体的性能参数如发射率、控温精度、温度的非均匀性等是黑体等效辐射亮度计算的重要参数。实验室定标黑体的参数如表 4.4 所示。

热像仪光学系统的口径为 260mm,为了减小黑体的重量和体积,采用面源黑体作为星上定标源。黑体的有效辐射面为椭圆,长轴为 340mm,短轴为 290mm,黑体的尺寸如图 4.9 所示。

表 4.4 黑体的性能参数

Table 4.4 The Performance parameters of blackbody

项目	参数描述
发射率	0.99
测温点个数	6
温度稳定性	0.02K
控温精度	0.03K
温度非均匀性	$\leq 0.22\text{K}$

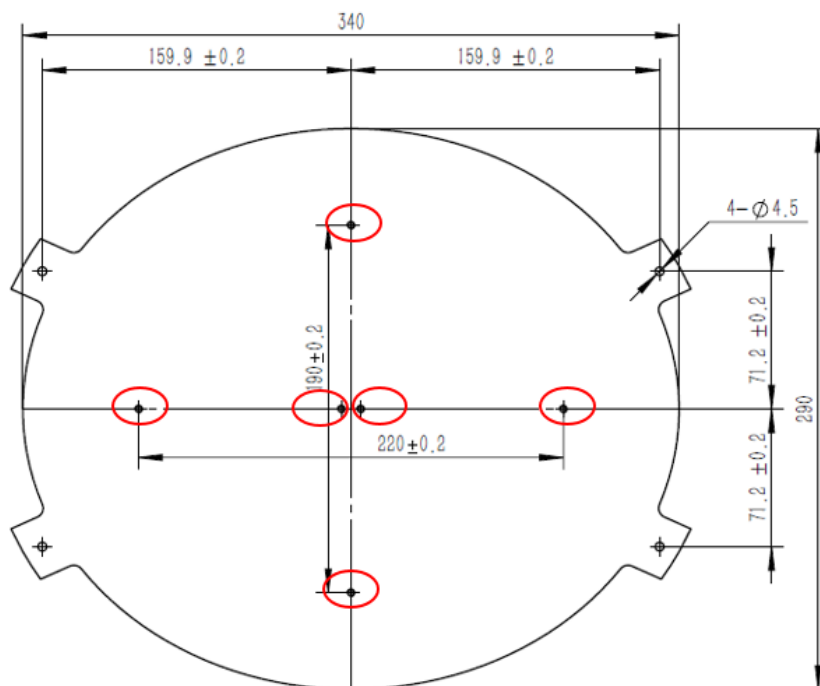


图 4.9 面源黑体的尺寸及 6 个测温点的分布

Figure 4.9 The size of the surface source blackbody and the distribution of 6 temperature measuring points

黑体采用铂电阻测温，共设置 6 个测温点，两两对称，测温点的位置如图 4.9 所示。单个测温点的测温精度优于 0.1K。面源黑体 6 个测温点的温度存在一定的差异，将黑体温度的非均匀性定义如下式：

$$T_{non-uniformity} = \max |T_i - \bar{T}|$$

其中， T_i 为第 i 个测温点的温度值， i 从 1 到 6， $\bar{T}$ 为 6 个测温点的平均值， $T_{non-uniformity}$ 为黑体温度的非均匀性。我们对面源黑体的温度分布进行了仿真，如图 4.10 中黑体下半面所示。

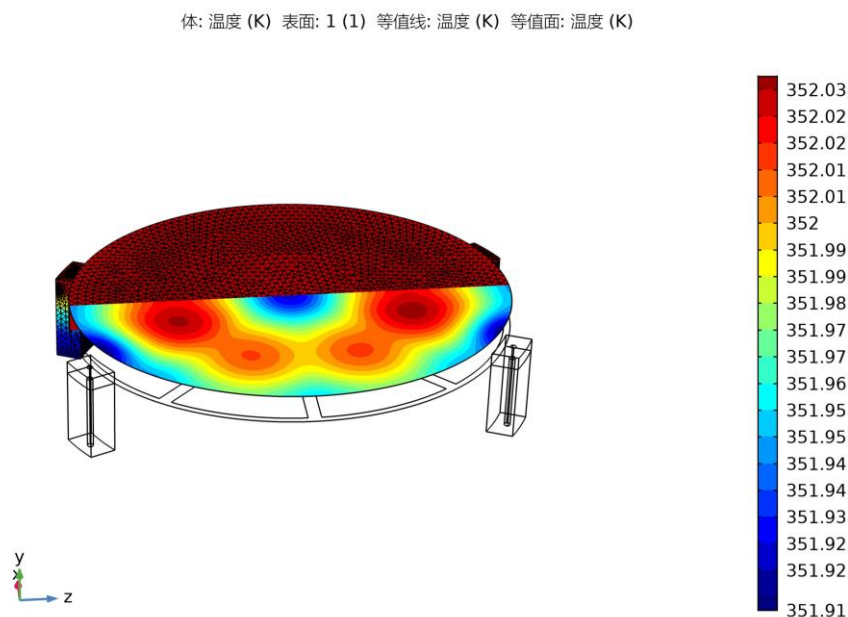


图 4.10 黑体辐射面的温度非均匀性

Figure 4.10 The temperature non-uniformity of the black body radiating surface

4.2 实验室辐射定标

4.2.1 实验室辐射定标分析

从第三章的分析来看, 仪器背景辐射是探测器输出信号中不可忽略的部分, 且仪器背景辐射随仪器温度的变化而变化。为了减小仪器温度变化引入的仪器背景响应误差, 实验室定标时黑体观测前后, 旋转扫描镜 90 度对热沉进行观测, 每次采集 1000 行的黑体或热沉数据。

探测器输出的数据首先进行像元选择以及饱和像元的替换, 然后将观测黑体时输出的灰度值去除背景。建立去除背景后的灰度值与黑体辐亮度的定标公式, 分别计算三个波段的辐射定标系数。辐射定标公式如下:

$$L_{BB} + L_{BG} = a_1 \cdot DN + b_1 \quad (4.9)$$

$$L_{BB} = a \cdot \Delta DN + b \quad (4.10)$$

$$\Delta DN = \overline{DN(i, j) - DN_{background}(i, j)} \quad (4.11)$$

L_{BB} 为黑体的辐亮度, L_{BG} 为仪器自身辐射的辐亮度。 DN 为观测黑体时的输出灰度值, ΔDN 为黑体响应减去背景响应的 DN 值。利用最小二乘拟合得到辐射定标系数 a 、 b 。在实验室定标时, 采用热沉代替冷屏采集背景响应。热沉的发射

率小于 1，经过热沉反射后的杂散辐射也会经过光学系统到达像面。因此，在定标计算前对其进行了修正。

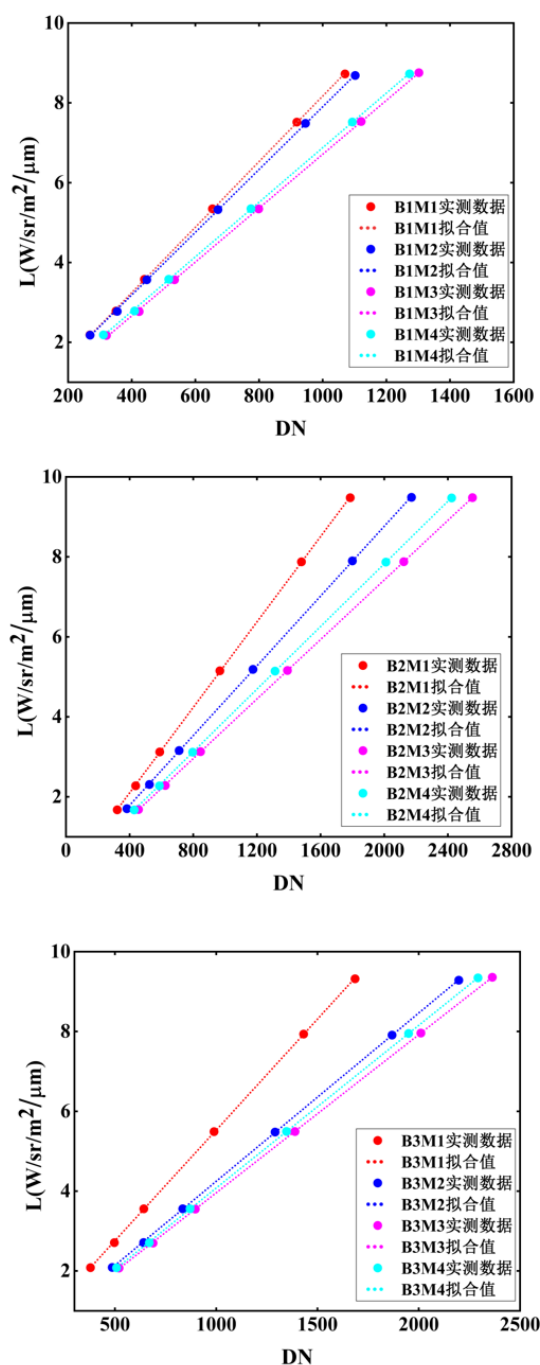


图 4.11 辐亮度与探测器输出值的关系 横坐标为去除背景后的响应值。

Figure 4.11 The relationship between the radiance and the output value of the detector.
The abscissa is the response value after removing the background

表 4.5 实验室定标下的辐射定标系数

Table 4.5 Radiometric calibration coefficients under laboratory calibration

波段	定标系数	M1	M2	M3	M4
B1	a	0.0082	0.0079	0.0067	0.0068
	b	-0.0443	0.0391	-0.0390	0.0366
B2	a	0.0053	0.0044	0.0037	0.0039
	b	-0.0395	0.0421	-0.0246	-0.0114
B3	a	0.0056	0.0042	0.0040	0.0041
	b	-0.0260	0.0278	-0.0078	-0.0027

图 4.11 中为三个波段 4 个模块的辐射定标曲线，表 4.5 列出了三个波段的定标系数，各模块的拟合优度均优于 0.999。

4.2.2 辐射定标不确定度分析

4.2.1 节中我们计算了在实验室条件下测试的辐射定标系数，本节将讨论黑体发射率、黑体温度、光谱响应、探测器噪声、拟合等因素产生的辐射定标不确定度，并计算总的辐射定标不确定度。

(1) 黑体发射率与黑体温度测量误差

黑体发射率的测量不确定度和黑体温度的不确定度都是影响黑体辐亮度计算的因素，黑体的发射率及其不确定度由计量院给出为 0.2%，黑体温度的不确定度包括了控温、温度稳定性以及表面温度的非均匀性。

它们对于定标不确定度的影响采用蒙特卡洛模拟法进行分析，具体步骤如下：

a) 根据黑体发射率(黑体温度)测量值及其误差分布（高斯分布）生成 j 个随机数；

b) 计算在该组黑体发射率（黑体温度）下的黑体辐亮度 $L_j(T)$ ，利用最小二乘法求出在辐亮度为 $L_j(T)$ 下的辐射定标系数 a_j, b_j ；

c) 根据辐射定标系数和 DN 值求出各定标温度点的拟合辐亮度 $L_j'(T)$ ；

d) 分别计算不同定标温度点 $L_j(T)'$ 的标准差；

e) 计算辐亮度标准差与初始辐亮度 $L(T)$ 百分比，该百分比即为黑体发射率（温度）的不确定度贡献。

$$u_T = 100\% \cdot \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^j (L_j'(T) - \overline{L_j'(T)})^2}}{L(T)} \quad (4.12)$$

利用蒙特卡洛方法对黑体发射率和黑体温度的不确定度带来的辐射不确定度进行计算。

(2) 光谱响应函数不确定度

探测器的光谱响应曲线通常在实验室条件下测试,其不确定度主要来源于探测器的噪声、光谱仪的中心波长不确定度。光谱响应测试的不确定度约为 0.1%。

(3) 探测器噪声

噪声是探测器输出不确定度的主要来源,定标精度会受到其影响。

(4) 辐射定标系数不确定度

使用蒙特卡洛法计算拟合不确定度时,首先需要生成满足高斯分布的一组定标系数的随机数。两个定标系数并不是互相独立的,因此在生成系数的随机数时,不仅要知道参数的估计值,还需要计算参数估计的协方差矩阵。协方差矩阵的计算方法如下式(4.13)所示:

$$C=(J^TWJ)^{-1} \quad (4.13)$$

C 为协方差矩阵, J 为 Jacobin 矩阵, W 为权重矩阵。根据协方差矩阵以及参数的估计值生成 5000 组高斯分布的随机数,即有 5000 个定标方程。计算在每个定标方程下的拟合误差和方差。

(5) 定标重复性

我们利用 4.2.1 节中的辐射定标系数对复测的定标数据中进行检验,定标重复性的温度不确定度分别为 0.261K、0.351K、0.380K。

辐射定标总的不确定度为上述各部分不确定度平方和的均方根,可用下式计算:

$$\sigma_{calibration} = \sqrt{\sigma_{fit}^2 + \sigma_{BB,T}^2 + \sigma_{BB,\varepsilon}^2 + \sigma_{spectral}^2 + \sigma_{noise}^2 + \sigma_{repeatability}^2} \quad (4.14)$$

表 4.6 实验室辐射定标的不确定度 (K)

Table 4.6 Uncertainty of laboratory radiometric calibration

不确定度 (K)	B1	B2	B3
光谱不确定度	0.067	0.102	0.058
黑体发射率	0.129	0.137	0.122
拟合误差	0.110	0.171	0.088
黑体温度	0.213	0.277	0.214
噪声	0.094	0.038	0.050
重复性	0.261	0.351	0.380
总的不确定度	0.389	0.500	0.464

从表 4.6 中来看,三波段的辐射定标温度不确定度均小于等于 0.500K,定标的重复性是不确定度对定标不确定度影响最大,光谱不确定度以及噪声对定标不确定度影响最小。

对于不同的探测器,不确定度的排序不同。MODIS 波段 31、32 主要的定标不确定度因素的排序为光谱响应、黑体发射率、黑体温度、探测器噪声和中心波长; Landsat 9 TIRS B10、B11 在定标过程最大不确定度因素为线性化; B11 波段的最大不确定度因素为拟合过程。对于不同遥感仪器不同波段对定标不确定度的影响因素排序受到各因素自身不确定度的大小以及探测器响应线性度等的影响。

4.3 CASEarth 卫星热像仪低频高效定标方案设计

4.3.1 在轨多源定标方案设计

实验室定标时,黑体温度的变化范围通常覆盖较大动态范围并设置多个定标温度点,根据多黑体温度点数据及对应的辐亮度通过最小二乘拟合即可得到定标系数。由于黑体升降温需要一定的时间,在轨定标时对多温度点的黑体频繁观测会减少对地观测时间。因此,遥感仪器的在轨星上黑体方案通常是高频次观测固定温度黑体和冷空、低频次观测多温度点黑体的定标方案。

MODIS 设计了一个冷空观测端口,每次扫描后都可以观测冷空和固定温度黑体(Terra MODIS 黑体温度固定在 290K)来更新线性定标系数。对于采用非

线性定标公式的遥感仪器，非线性定标系数和截距的更新需要对黑体的多个温度点进行观测。

MODIS 的热红外波段定标公式为非线性，受到黑体升降温时长等的限制，（Terra MODIS）星上黑体温度范围比发射前的定标实验小很多。星上黑体共设置 7 个温度点，分别为 272.5 K、282.5 K、297.5 K、302.5 K、307.5 K、312.5 K、315K。在轨黑体的升降温过程共计 46 小时^[17]。此外，探测器响应率的稳定性是定标频次设计的关键。MODIS 热红外波段每年的响应率变化小于 1%，因此每年 4 次的黑体升降温定标实验可满足定标要求。

冷空是在轨遥感仪器常用的低温定标源，温度约为 4K，因此其辐射可以忽略，冷空观测值可用于去除仪器背景、直流偏置和暗电流。Landsat 7 ETM+由于仪器的限制，其低温定标源用快门代替。为了去除快门温度对输出灰度值的影响，在实验室定标时建立快门温度与输出灰度值之间的关系对其修正。表 4.8 列出了 MODIS、Landsat 8 TIRS 和 Landsat7 ETM+低温定标源的在轨观测方案。

表 4.7 遥感仪器的冷背景观测方式、频次等

Table 4.7 The cold background observation method and frequency of remote sensing instruments

载荷名称	冷源	冷源的观测方式	观测频次
Landsat 7 ETM+	快门	直接观测快门	每次扫描
Landsat 8 TIRS	冷空	通过冷空观测关口	约每 40 分钟
MODIS	冷空	通过冷空观测端口	每次扫描

CASEarth 在轨的定标源为温度可变的黑体和冷空。不同于 MODIS、GOES-R ABI 等摆扫式遥感仪器，在每次扫描结束后均可对冷空观测，热像仪需要卫星侧摆才能观测冷空。此外，由于卫星重量的限制，不能像 Landsat7 ETM+增加额外的低温定标源，因此冷空的观测频次较低。低频次定标对定标精度的影响主要有两方面，一方面，背景响应会随仪器温度场的变化而变化且无法定量测量，在两次观测时间间隔内，背景响应的变化会对目标反演精度产生影响；另一方面，当背景响应发生变化时，通过摆扫观测黑体数据计算的黑体定标系数变化时，无法判断是由于背景响应或者探测器响应率发生了变化。

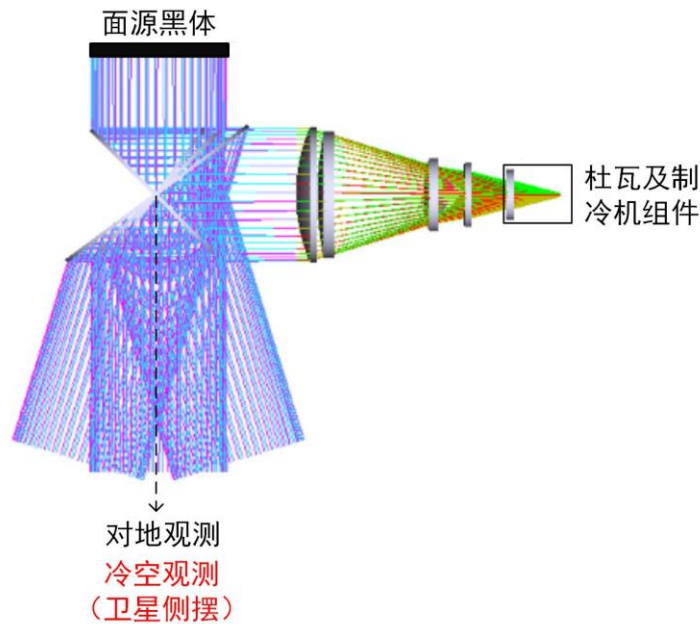


图 4.12 在轨辐射定标光路示意图

Figure 4.12 Schematic diagram of on-orbit radiometric calibration optical path

在定标频次设计时,我们首先对某款采用相同工艺制作的探测器的长周期响应率随时间的变化进行了分析,如表 4.8 所示。

表 4.8 某探测器长周期响应率分析

Table 4.8 Analysis of the long-period response rate of a certain detector

与第一次定 标间隔天数	0	14	25	42	53
相对响应率	0.9933	0.9916	0.9942	0.9940	0.9917

从上表中可以看出,该探测器响应率在 53 天内的变化很小,两次定标计算的响应率变化小于 0.3%。该探测器的响应率变化可为在轨的定标频次提供参考。在两周内探测器响应率的变化可以忽略,考虑到探测器响应率的稳定性及卫星在轨观测条件,在轨的黑体升降温和冷空观测频次拟设置为两周。

CASEarth 热像仪在轨的定标方案为星上黑体在对地观测时温度保持在 270K 以下(暂定),每次摆扫结束后对星上固定温度黑体进行观测并计算线性定标系数。

黑体升降温定标则以两周为固定时间间隔进行。在每两周采集黑体升降温和冷空观测数据后,定标公式中的两个定标系数均可更新。CASEarth 热像仪的定标频次低,背景响应的变化在辐射定标系数计算和目标能量反演时都会产生影

响,对定量化应用产生影响。为了降低背景响应在两次观测间隔内的变化对定标精度的影响,提出了一种基于随机森林的背景响应预测算法对背景响应进行高频次更新,具体内容在 4.4 节。根据每次扫描结束后的黑体观测值和背景响应预测值可计算线性辐射定标系数,将线性辐射定标系数与历史系数比较。若偏差较大,需要对温度点黑体进行定标,判断定标系数变化的原因并重新计算。在轨线性定标系数的更新公式如下:

$$a' = \frac{L_{BB} - b}{(DN - DN'_{background})} \quad (4.15)$$

其中, DN 为摆扫后观测固定黑体温度点的数据, $DN'_{background}$ 为根据背景响应预测算法计算的背景响应。热像仪在轨线性定标系数更新的流程如图 4.13 所示。

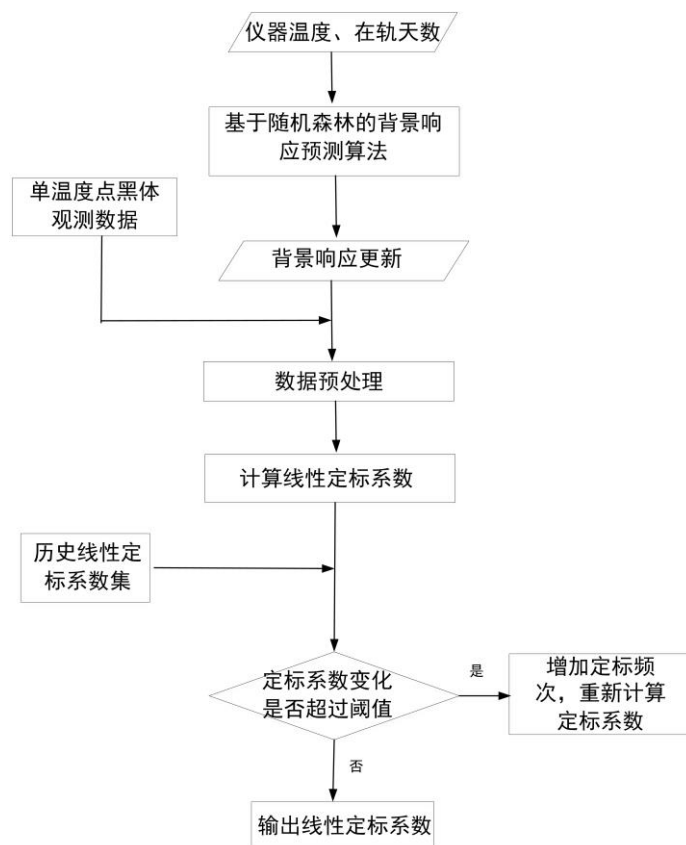


图 4.13 热像仪在轨线性定标系数更新流程

Figure 4.13 TIRI on-orbit linear calibration coefficient update process

除了星上黑体和冷空外,利用天体如月球、恒星等作为外部定标源的定标方法也成为研究的热点。对地观测卫星的口径较小,且灵敏度通常低于天文望远镜

的灵敏度。我们根据热像仪的口径、噪声等效灵敏度、积分时间等参数计算了恒星观测能力。在与对地观测同样的参数下，三个波段分别能观测到的恒星星等约为-1.88，-2.04，-1.98 星等，我们从红外星表中找到了符合该条件的红外恒星，部分可观测到的恒星的坐标和星等如表 4.9 所示。因此，在轨可尝试采用恒星作为外部定标源进行绝对辐射定标、交叉定标。此外，在轨对恒星观测时，我们可采取增加积分时间、更换积分电容等方法提升仪器的观星能力，为基于恒星观测的辐射定标奠定基础。

表 4.9 部分满足热像仪观测要求的恒星

Table 4.9 Some stars that meet the requirements of TIRI

RAJ2000	DEJ2000	星等
00 24 02.006	+38 34 38.28	-2.6
00 23 14.587	+55 47 33.27	-2.58
01 06 25.905	+12 35 46.82	-4.02
01 09 43.943	+35 37 13.94	-2.14
03 02 16.769	+04 05 23.00	-1.72
02 22 51.783	+58 35 12.61	-2.05
02 25 43.494	+62 06 15.85	-2.3

基于月球、恒星的观测数据为辐射定标提供了新的验证手段。热像仪在轨定标的观测方案及系数更新方案如表 4.10 所示。

表 4.10 在轨定标观测方案设计

Table 4.10 Design of Observation Scheme for on-orbit calibration

定标源	观测频次	目的
黑体（固定温度点观测）	每次扫描后	计算线性定标系数
黑体（多温度点观测）	两周	定标系数计算、非均匀校正系数
冷空	两周	去除背景响应
恒星	/	定标系数计算
月球	/	定标系数计算

4.3.2 恒星辐射定标验证

我们利用某大口径红外相机的恒星观测数据对红外恒星定标方法进行了验证。采用恒星作为定标源的第一步是可从多次恒星观测数据中找到辐射特性稳定且能高频次观测到的恒星，建立该相机的定标星列表。从星表中找到定标星对应

的星等，并在相机的谱段内对恒星辐照度进行外推。

恒星为点目标，在像面上成像区域为 3×3 像元。我们以像面输出峰值像元为中心，取 7×7 的区域中的非恒星成像区域的平均值作为背景响应值。将 3×3 像元的探测器输出值减去背景后求和作为恒星实际响应值。

利用恒星观测数据获取辐射定标系数的方法与黑体定标相同，基于恒星观测的辐射定标曲线如图 4.14 所示。采用恒星辐照度和探测器采集到的数据拟合时，定标曲线的线性度很好，R-square 为 0.996，平均拟合误差约为 3.72%。

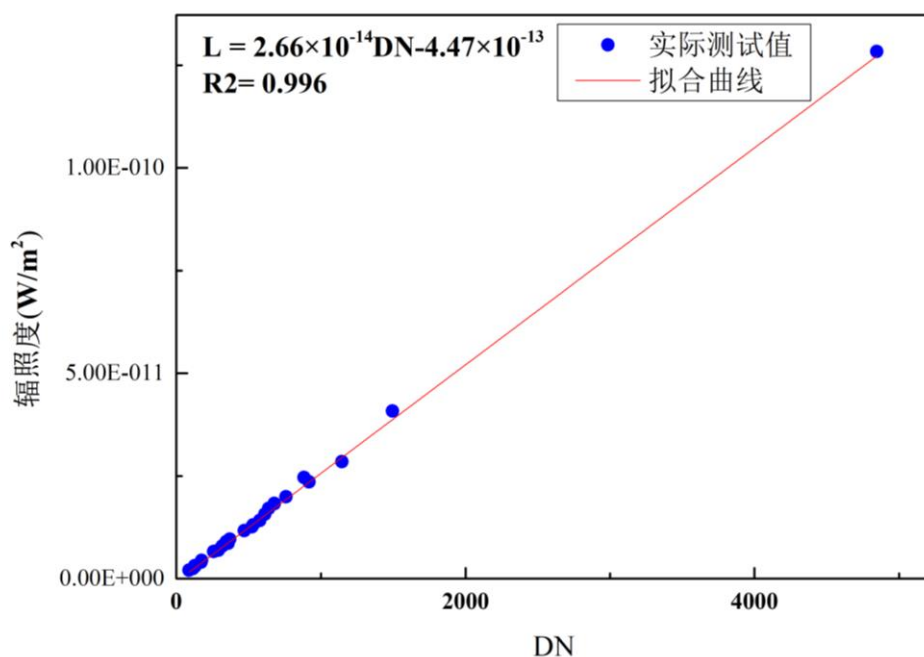


图 4.14 恒星定标曲线

Figure 4.14 Stellar calibration curve

使用恒星定标时，定标不确定度的构成与黑体定标有所差异。基于恒星观测的定标不确定度包括恒星能量提取的不确定度、恒星能量外推的不确定度、探测器的非均匀性、噪声等。

4.4 基于随机森林的背景响应预测方法

本节首先对仪器背景响应的变化的机理进行分析，构建地面多温度场实验的背景响应预测模型并验证。此外针对在轨长周期运行时探测器的响应率随时间发生变化的问题，提出了基于随机森林的背景响应预测算法。

4.4.1 地球静止轨道红外相机光学系统

图 4.15 为某地球静止轨道卫星上携带的大口径相机光学系统。对于大口径相机，由于物方黑体重量和尺寸的限制，常采用像方内黑体或其他外部定标源进行定标。如 FY-2 的光学口径为 600mm，采用 20mm 尺寸的像方内黑体作为内部定标源。哈勃望远镜由于其灵敏度高、能量集中度较低，采用恒星作为定标源进行辐射定标。对于图 4.15 的大口径相机，将星上黑体放置在后光路中，通过插入或移除定标镜实现定标模式和对地/冷空观测模式之间的切换。

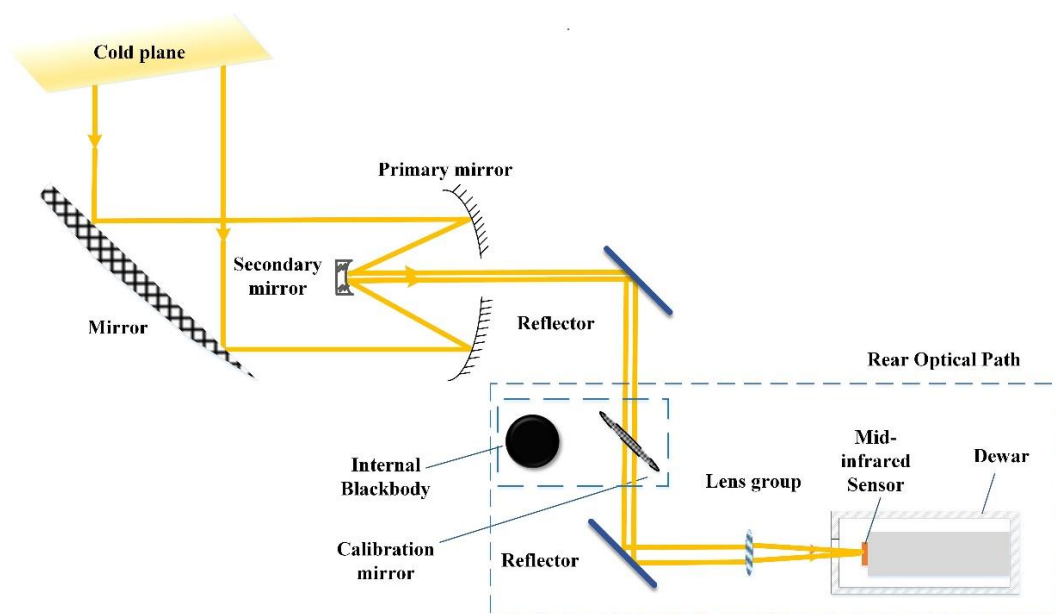


图 4.15 相机的光学系统

Figure 4.15 The optical system of the camera

在进行辐射定标时，黑体需要改变温度以获取不同辐亮度的探测器输出值。为了减小黑体温度变化对其他组件的温度产生影响，在黑体前放置一个低温挡板。此外，该系统采用冷光阑匹配的设计减小到达焦平面的杂散光。

地球静止轨道卫星在轨运行时，受到轨道外热流的影响，仪器温度场在一天内发生周期性的变化，仪器的背景响应也在一天内发生周期性的变化。实验室测试时，为了模拟在轨外热流对仪器温度场的影响，在 8 天内设置多组仪器温度场并采集定标数据。黑体的温度在 8 天内的温度范围 265K—330K，黑体温度在每日设置为一个固定值，逐日增加黑体温度，采集多温度点的黑体数据。不同组件的工作温度和温度变化的范围不同，表 4.11 列出了组件的温度变化范围。在设定的各仪器温度场条件下，依次采集两组不同积分时间的冷屏数据。由于采集两

组积分时间数据的时间间隔很小，仪器温度场在不同积分时间采集间隔内的变化可以忽略。

表 4.11 真空罐实验中主要组件温度的变化

Table 4.11 Changes in the temperature of main components in the vacuum test

组件	最小温度(K)	最大温度(K)	变化范围(K)
扫描镜	272.5	280.1	7.6
主镜	265.0	285.8	20.8
次镜	265.3	285.8	20.5
光路框架	262.8	276.4	13.6
后光路框架	264.6	277.7	13.1
杜瓦窗口	256.0	270.7	14.7

4.4.2 基于多元线性回归的背景响应建模方法

仪器自身热辐射与其温度、立体角、表面发射率和到达像面经过的光学路径有关。仪器杂散辐射产生的电子数的表达式如式(2.31)所示，该式假定了自身热辐射的响应在探测器响应的线性区间。

不同于黑体定标公式，辐射通量的来源只有黑体，通过线性拟合即可得到增益和偏置系数。仪器自身热辐射包含了多组件的辐射，且各组件的温度、立体角、发射率等参数均不相同，因此利用多元线性回归对背景响应建模。如图 4.16 显示了光学透镜和杜瓦窗口的自身热辐射对应的有效立体角。

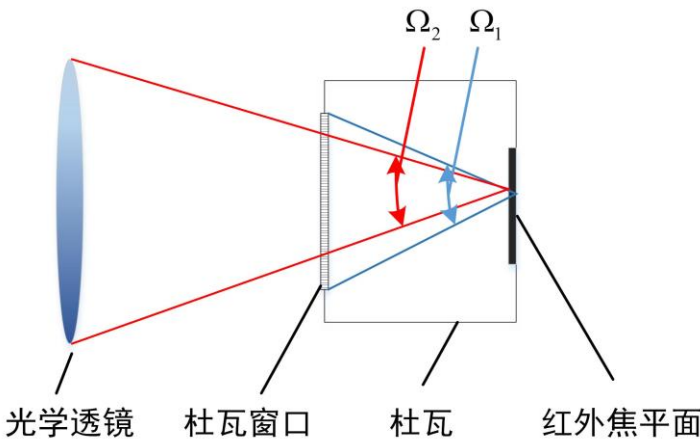


图 4.16 不同组件的自身热辐射到达像面的有效立体角

Figure 4.16 The solid angle of the self-emission of different components

观测冷屏时探测器响应的 DN 值中除了仪器自身热辐射的响应，还包括暗电

流和探测器偏置。焦平面温度的稳定性是探测器稳定工作的重要保障,实验时将红外焦平面置于杜瓦内由制冷机制冷,焦平面温度稳定度高,在计算中假设暗电流不变。

将在轨的仪器设计温度工况定义为标准工况,标准工况下仪器自身辐射响应的 DN 值记为 DN_0 ,各组件温度记为 $T_{i,reference}$,采用式(4.16)进行多元线性拟合。表 4.12 列出了从 fit 过程中获得的参数 p_i 值。

$$DN_{background} - DN_{background,reference} = \sum_{i=1}^5 p_i A_d t \left(\int L_{q(i)}(T_i, \lambda) \tau(\lambda) d\lambda - \int L_{q(i,reference)}(T_{i,reference}, \lambda) \tau(\lambda) d\lambda \right) \quad (4.16)$$

其中, p_i 包括了立体角、发射率、各组件经过的光路的光学透过率等参数的乘积, $\tau(\lambda)$ 仅为滤光片的透过率。在计算前,首先对像元响应的 DN 值进行预处理,包括非均匀校正、盲元替换以及采用多帧平均的灰度值以减小时间噪声等处理。在模型拟合时,变量太多会导致模型的过拟合。为了保证变量子集的显著性,采用了逐步回归的方法选择自变量组合。模型最终选取的自变量有黑体、光路、后光路、主镜和杜瓦的温度。

表 4.12 拟合得到的参数值

Table 4.12 Parameter values obtained by fitting

参数值 ($\times 10^{-5}$)	4.5ms	13.54ms
扫描镜	0.8870	1.1722
主镜	0.5296	0.4225
黑体	0.03008	0.0177
光路框架	5.4237	5.6767
杜瓦	1.0623	1.0545

红外成像是复杂的光机热的综合系统,各组件的发射率、自身热辐射到焦平面的光学路径等不同,因此在自身热辐射中所占的比例不同,参数的大小反应的该组件的自身热辐射在总的自身热辐射中的比例。从表 4.12 可以看出,光路框架在拟合中得到的参数值比其他组件对应的参数值大,即在所选的 5 个组件中它对自发射的贡献最大。内部黑体对应的参数最小,相对于其他组件来自身热辐射的比例在总的自身热辐射中最小,这也证明了低温挡板设置的有效性。

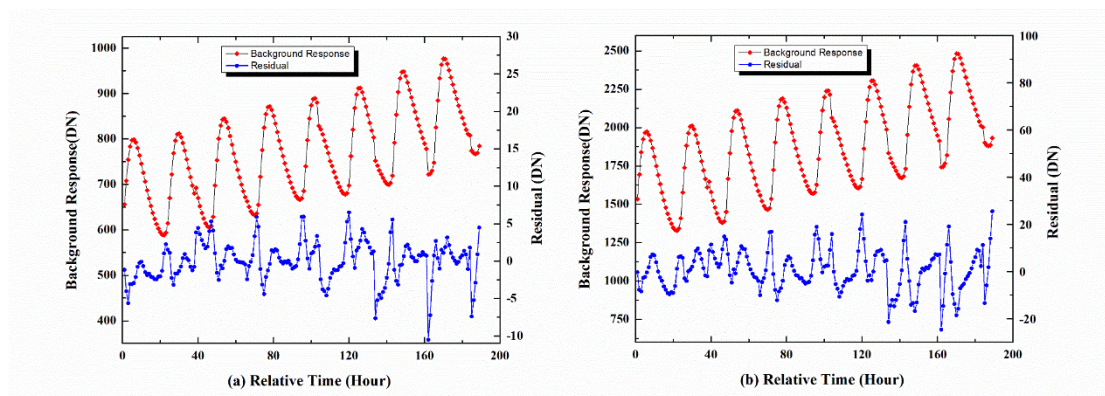


图 4.17 模型拟合值和残差分布，积分时间 (a) 4.5ms(b)13.54ms。

Figure 4.17 Model fitting value and residual distribution, integration time (a) 4.5ms (b) 13.54ms

图 4.17 (a)和(b)分别为不同积分时间的残差分布。在地面实验时，组件温度在 24 小时内规律性变化，且后一天的仪器温度比前一天的仪器温度高；背景响应的变化规律与组件温度的变化规律相同。由式(4.16)来看，积分时间与背景响应输出呈线性关系。两个积分时间采集背景响应的时间间隔很小，仪器温度变化可以忽略，背景响应和残差随积分时间的变化规律一致。

如图 4.17 图 4.18，随积分时间的增加，背景响应值也增加，因此残差的数值在增大，但与背景响应的百分比差异较小。在积分时间为 4.5ms 时，残差范围小于 ± 11 ，积分时间为 13.54ms 的残差范围小于 ± 26 。残差绝对值的均值与背景响应均值之比分别为 0.26%和 0.35%。

此外，我们还采用了 R^2 对拟合的效果评估， R^2 拟合优度，表示的是在总变量中模型解释的百分比，其定义如下：

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Y_{\text{true}} - Y_{\text{pred}})^2}{N * \text{Variance}_{Y_{\text{true}}}} \quad (4.17)$$

从图 4.18 来看，模型残差呈正态分布，拟合优度均大于 0.999。拟合优度越大，自变量对因变量的解释程度越高，因此，该模型能很好的对背景响应随仪器温度变化的规律解释。

仪器背景响应的变化会对定标系数产生影响，我们比较了使用本节公式得到的背景响应值与实测的背景响应值计算的定标误差。结果表明两种方法的差异最大约为 0.03K 如图 4.19 所示。因此该方法可有效应用于背景响应的更新。

表 4.13 不同积分时间的拟合结果

Table 4.13 Fitting results of different integration times

积分时间	4.5ms	13.54ms
R^2	>0.999	>0.999
RMSE	2.667	8.544

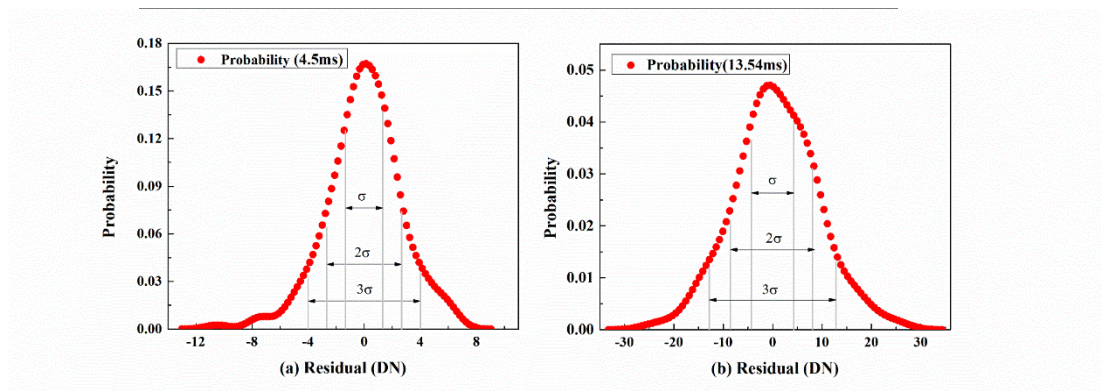


图 4.18 不同积分时间下的模型残差概率分布

Figure 4.18 Probability distribution of model residuals under different integration times

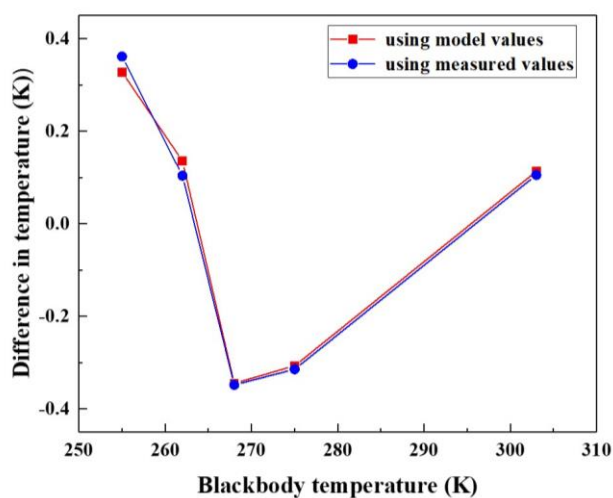


图 4.19 使用两种背景响应的定标误差

Figure 4.19 Calibration error using two background responses

从构建背景响应所用的数据来看,拟合的不确定来源分为温度的不确定度和探测器输出 DN 值的不确定度。温度的不确定度包括不同组件的温度控制精度,测温误差。此外,组件的温度是由贴片电阻测量,仅能对单一位置处的温度测量。在实验室测试时,使用加热片对组件温度加热,组件的温度非均匀性也是温度不确定度的来源。

4.4.3 基于随机森林的在轨背景响应建模方法

4.4.2 节提出了多元线性回归的背景响应模型，并利用实验室条件下采集的不同仪器温度场的背景响应数据进行验证。实验室测试时，红外系统置于真空罐内，系统的性能不会受到空间辐射的影响，假设在测试期间系统光路的透过率不变；且测试时间只有 8 天，探测器响应率假设不变，因此构建的背景响应模型仅与各组件的温度相关。

系统在轨运行时，受到空间辐射、自身材料、结构等因素的影响，光学元件的透过率和探测器的响应率均可能随在轨时间的增加发生变化，其衰减的程度通常可从相机的绝对定标系数随在轨时间的变化获得。因此相机在轨运行时，背景响应除了受到仪器温度场的影响外，还受到相对光谱响应率、探测器响应率等因素随在轨时间的变化影响。

该红外系统的星上黑体为内黑体，内黑体计算的辐射定标系数不能反映出前光路透过率的变化。因此，我们追踪了对同一目标观测时的长周期数据并进行比较分析，发现目标的响应灰度值有随时间变化的趋势。在轨长周期背景响应预测时必须要考虑仪器随时间变化的因素。

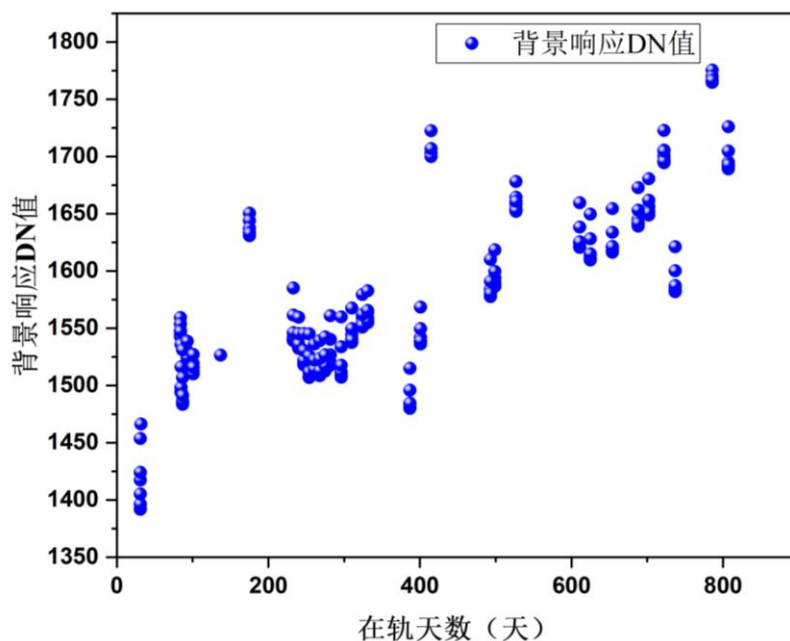


图 4.20 背景响应随在轨时间的变化

Figure 4.20 Background response changes with time on-orbit

$$DN_{background} = f(T_{instrument}, R, \tau) \quad (4.18)$$

4.4.2 节中的模型仅考虑了组件温度这一因素, 光学透过率 τ 、探测器响应率 R 随在轨时间的变化并不是简单的线性变化。因此提出了使用机器学习方法对长周期的背景响应进行预测, 增加在轨时间作为自变量对光学透过率、探测器响应率等随时间变化的物理量描述。在轨运行时在固定积分时间下观测冷空来获取背景响应数据。通常, 在轨定标的周期为两周一次, 受到卫星整体的调度, 部分时间的定标周期变大。完整的定标过程包括黑体升降温观测、以及特定黑体温度点采集后的冷空观测, 即在定标日有多组冷空观测数据。

我们目前采集到了约 800 天的在轨背景响应数据, 背景响应在 800 天内的最小值为 1400, 最大值约为 1700, 最大变化了约 20%, 如图 4.20 所示。

在轨运行时, 仪器各组件的温度受到轨道外热流的影响发生变化。图 4.21 显示了扫描镜、光路框架、主镜、杜瓦窗口的温度随时间变化的曲线。定标日采集的多组数据中, 各组件的温度在单日内受到黑体温度变化发生变化, 组件温度最大变化不超过 2K。在轨 800 天内, 在定标时段内, 四个组件温度最大变化约为 5K, 且不同组件的温度变随在轨时间的变化规律不同。

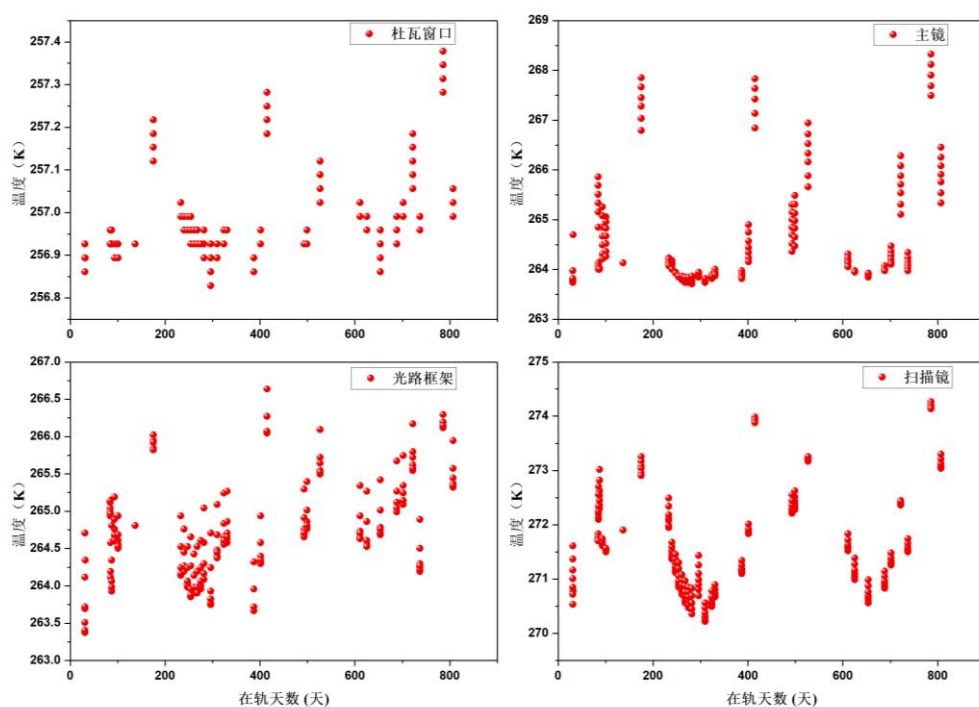


图 4.21 在轨组件温度随时间变化曲线 (扫描镜、光路框架、主镜、杜瓦窗口温度)

Figure 4.21 The temperature change curve of the on-orbit scanning mirror, light path frame, main mirror, and Dewar window over time

遥测下传的温度信息有很多, 过多的变量信息可能会造成数据的过拟合。我

们采用随机森林算法对特征选择,其原理是计算每个特征在随机森林中的每颗决策树上的贡献,取所有树的贡献平均值进行比较。将重要性较小的因素剔除,最终选取的变量有时间、光路框架、扫描镜、主镜和杜瓦窗口。

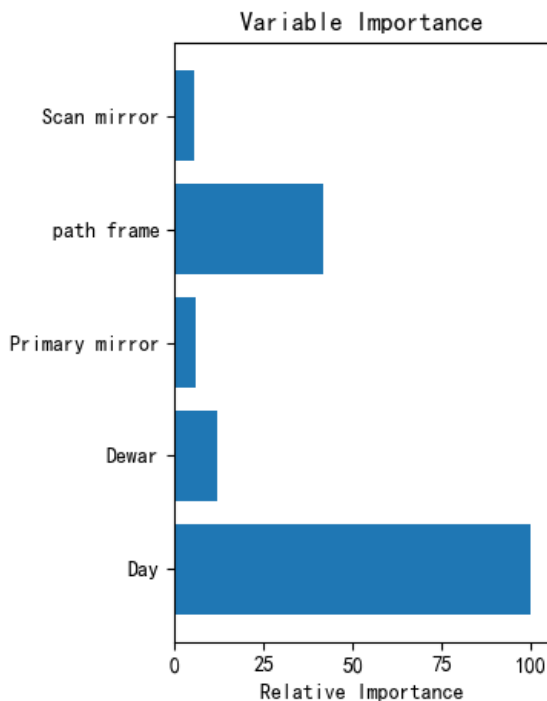


图 4.22 变量重要性排序

Figure 4.22 Variable importance ranking

图 4.22 中所列举的变量包括扫描镜温度、光学路径温度、主镜温度、杜瓦温度和在轨天数,其中在轨天数是对长周期背景响应变化的影响最大的变量。

机器学习是指计算机使用算法对数据的规律和信息进行学习(训练模型的过程),然后使用模型进行预测。集成学习算法是机器学习中的一类,是将多种模型组合在一起,得到一个更全面的模型。我们采用了三种常用的集成学习算法对背景响应进行预测,随机森林、AdaBoosting、GDBT 算法。三种算法都是基于决策树的模型,随机森林是一种 bagging 算法,该算法的具体过程如图 4.23 所示。AdaBoosting 和 Gradient Boosting Decision Tree (GDBT) 均为 boosting 算法^[145-147],boosting 算法的具体过程如图 4.24 所示。

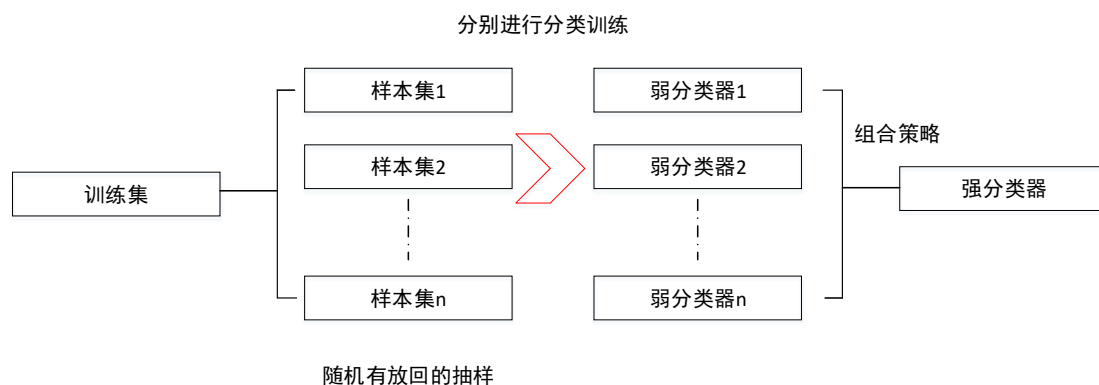


图 4.23 Bagging 算法图解

Figure 4.23 Bagging algorithm diagram

随机森林可用于分类、回归预测，具有较高的准确率。随机森林的具体步骤包括：

- (1) 从样本中随机有放回的选取 n 个样本，根据输入的特征，建立分类器。分类器可选择二叉决策树、向量机等。
- (2) 重复上述步骤 k 次，可得到 k 个分类器。
- (3) 将多个分类器的预测结果平均，即可得到最终的预测结果。

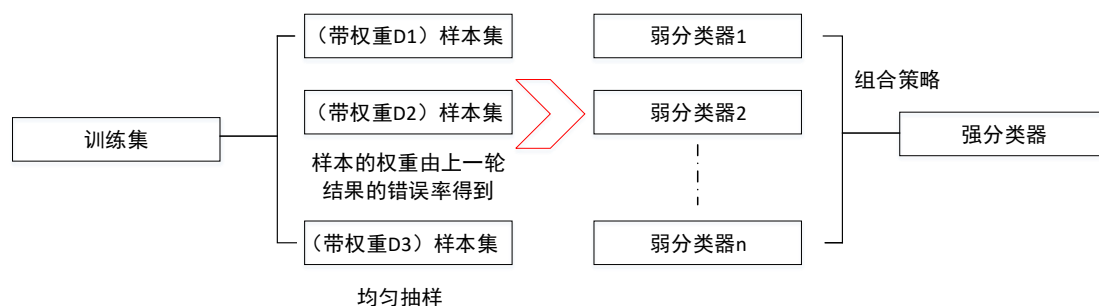


图 4.24 Boosting 算法图解

Figure 4.24 Boosting algorithm diagram

Boosting 算法与 Bagging 法相比，在样本的选择和样本权重上都有不同。Bagging 算法的样本，在每次训练时是相互独立的，且每个样本的权重相等。Boosting 算法中，每一个样本都具有权重，且由上一轮结果的错误率计算得到。而样本集的数据不发生改变。

4.4.4 实验结果及误差分析

RF (随机森林)、Adaboosting、GDBT 算法中包括多个参数，如在随机森林中的子树数量 $n_estimators$, 单个决策树使用的最大特征数 $max_features$, 决策树的

最大深度 max_depth 等。为了提升算法的效果,采用网格搜索的方法寻求最优参数,并在最优参数下对数据进行计算。

k 折验证可评价训练数据集的数据集泛化能力,防止模型的过拟合。对于数据集较小的情况,k 折验证可充分利用数据集进行测试。本节采用 k 折验证对数据集进行测试。它的方法是将数据集等分为 k 份,每次选取 (k-1) 份作为训练集,剩余的 1 份为测试集进行验证,该过程重复 k 次,取 k 次回归模型的方差得分的平均值作为评价指标。三种算法均对数据集进行了 10 折交叉验证,下面展示了 Adaboosting、RF、GDBT 三种算法的交叉验证结果。

表 4.14 不同算法的 10 折交叉验证结果

Table 4.14 10-fold cross-validation results of different algorithms

算法	explained_variance_score	MAE
Adaboosting	0.953	9.924
GDBT	0.979	5.96
RF	0.985	4.31

表 4.14 中的 $\text{explained_variance_score}$ 是 10 折交叉验证的平均值,该参数用来解释回归模型的方差得分,取值范围是[0,1],其值越接近 1,则模型的预测结果越好。 $\text{variance}_{(Y_{\text{true}}-Y_{\text{pred}})}$ 用来描述预测值与实际值偏离的程度。

$$\text{explained_variance_score} = 1 - \frac{\text{Variance}_{(Y_{\text{true}}-Y_{\text{pred}})}}{\text{Variance}_{Y_{\text{true}}}} \quad (4.19)$$

平均绝对误差 (MAE), 可用来评估预测值和真实值的接近程度,其值越小越好。

$$\text{MAE} = \overline{|Y_{\text{true}} - Y_{\text{pred}}|} \quad (4.20)$$

将数据集按照 9:1 的比例随机划分为训练集和测试集,分别计算训练集和测试集的平均绝对误差和方差。

表 4.15 训练集和测试集的平均绝对误差和方差

Table 4.15 Average absolute error and variance of training set and test set

	训练集	测试集
平均绝对误差	2.61	4.31
方差	15.55	41.62

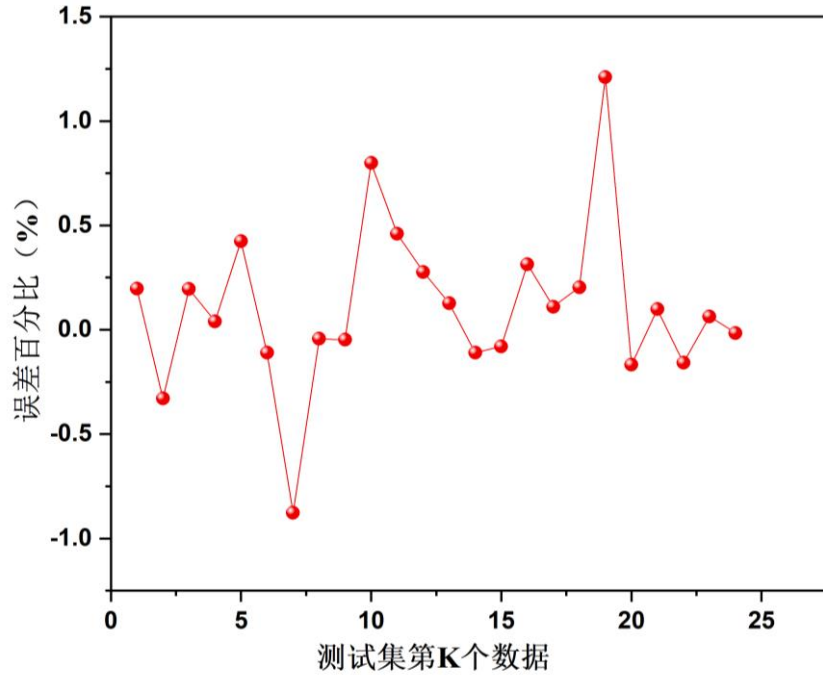


图 4.25 背景响应的预测误差百分比

Figure 4.25 Percentage of prediction error for background response

从测试集的结果来看，背景响应预测误差与背景响应值的最大比例为 1.21%，背景响应平均绝对预测误差约为 4.31，小于两次定标间隔的平均变化的 DN 值（约为 46）。在背景响应预测值的误差为 4.31 时，分别采用背景响应预测值与背景响应实测值计算辐亮度，在黑体温度为 265K 时，两种方法的辐亮度误差仅为 0.25%。计算公式如下所示：

$$L' = (DN - DN'_{background} - b) / k \quad (4.21)$$

$$L = (DN - DN_{background} - b) / k \quad (4.22)$$

$$\Delta L = 100\% \cdot (L' - L) / L \quad (4.23)$$

式中， k, b 分别为定标系数， $DN'_{background}$ 为实测背景响应灰度值加上平均绝对误差， L 为使用实测背景响应值计算的辐亮度， L' 为加入误差的背景响应值计算的辐亮度。

此外，我们对比了传统多元线性回归方法与本文提出的基于随机森林的长周期背景响应方法的结果进行了对比，结果如表 4.16 所示。表中列举了多元线性回归与随机森林算法的计算得到的平均绝对误差。在不加入时间作为自变量，仅考虑组件温度的因素进行多元线性拟合时，预测效果最差，平均绝对误差为

25.8977；多元线性回归中加入时间自变量后，平均绝对误差降低了 28%，即长周期背景响应受到仪器温度和与时间相关的因素的影响。采用随机森林对长周期背景响应的预测结果最好，平均绝对误差与采用多元线性回归方法相比降低了约 77%。

表 4.16 多元线性回归与随机森林算法的误差比较

Table 4.16 Error comparison between multiple linear regression and random forest algorithm

算法	平均绝对误差
多元回归 (不加入时间变量)	25.8977
多元回归	18.6003
随机森林	4.31

基于随机森林的背景响应预测方法不同于文献中仅利用温度作为自变量进行线性拟合的背景响应预测方法，通过对仪器温度变量的筛选多个温度变量，且在算法中考虑到光学系统透过率和探测器响应率随时间的变化，该方法可适用于在轨大时间尺度下的背景响应预测。特别是对于冷空观测频次低且在轨仪器温度场变化的热红外遥感仪器，该方法可利用遥测温度信息高频次更新在不同仪器温度场的背景响应，实现高精度的辐射定标。

4.5 本章小结

本章主要对热像仪的实验室定标和在轨定标方法进行了研究。首先，针对 4 级 TDI 探测器的像元响应的差异，提出了一种基于多温度点遍历的 4 级 TDI 最佳像元选择方法，三个波段的 NEdT 相较于传统的 TDI 方法分别减小了 13.14%，7.30%，9.36%。针对黑体面源温度的非均匀性、光谱响应的非均匀性建立了地面测量和分析方法。在真空低温条件下进行了辐射定标实验并进行了辐射定标解算，三波段的辐射定标不确定度优于 0.500K。再次，摆扫式热像仪在轨定标时对冷空的观测需通过卫星侧摆实现，定标频次受到限制。我们提出了低频高效的辐射定标方案，每轨观测结束后对固定温度黑体进行观测，每两周摆扫对冷空、多温度点黑体观测。除了黑体和冷空作为定标源外，还提出了采用红外恒星、月球作为外部定标源的定标方案。利用某红外相机的恒星观测数据，进行了基于恒

星观测的辐射定标的验证,平均辐亮度误差优于 3.72%。最后针对热像仪在轨背景响应更新频次低的问题,提出了基于随机森林的在轨背景响应预测方法,实现了背景响应预测误差优于 1.21%。与传统的多元线性算法比较,基于随机森林的预测误差平均绝对误差与采用多元线性回归方法相比降低了约 77%。该方法可实现基于遥测温度信息的在轨高频次更新背景响应,为高精度的辐射定标及定量化应用奠定基础。

第5章 总结与展望

5.1 总结

红外热像仪的辐射定标精度是其遥感数据定量化应用的基础。本文围绕红外热像仪的高灵敏度优化设计、低频次定标方案设计、在轨高精度辐射定标解算等方面进行分析和研究，主要的研究内容如下：

(1) 为了抑制杂散光，在设计时采用了镜片后表面增加挡光环、杜瓦内部采用二级冷阑等设计方案，并利用仿真软件对外部杂散光进行了仿真。仪器自身热辐射是仪器的温度函数，我们在不同仪器温度条件下仿真了仪器背景响应，以仿真计算结果为指导开展了网格梯度温度实验。以仪器功耗为约束条件，仪器的背景响应、暗电流与 300K 目标信号的比例、NEdT 为极值寻优条件，对仪器的温度进行了优化设计。实验结果表明，三个谱段的仪器自身热辐射与 300K 目标比例均与 Landsat8 TIRS 的设计值相当。

(2) 热像仪为长线列摆扫成像方式，在轨辐射定标时需要卫星侧摆才能对冷空观测，而高频次定标会减小探测器可用对地观测时间。为了减小仪器背景响应变化对定量化应用的影响，提出了一种基于温度场的高频次背景响应预测方法。利用长周期的在轨背景响应数据对该方法进行了验证，实验结果表明背景响应预测误差与背景响应值的比例优于 1.21%。我们设计了红外热像仪的低频次定标方案，单轨观测一次定温黑体、两周进行一次卫星侧摆冷空观测及多黑体温度点观测。除了采用星上黑体、冷空作为定标源外，引入红外恒星、月球作为交叉辐射定标校验源，并在其他卫星上对恒星定标方法进行了验证。

(3) 针对 4 级 TDI 探测器的像元响应的差异，提出了一种基于多温度点遍历的 4 级 TDI 最佳像元选择方法，三个波段的 NEdT 相较于传统的 TDI 方法分别减小了 13.14%，7.30%，9.36%。对影响辐射定标精度的光谱响应的非均匀性、大面源黑体温度的均匀性等参数建立了地面测量分析方法。在真空罐内开展了低温辐射定标实验，定标不确定度优于 0.500K。

5.2 工作展望

由于热像仪目前还未发射，本文仅对热像仪在实验室条件下的测试数据进行

了分析。在热像仪摆扫长线列探测器需要卫星侧摆才能观测冷空的限制下,设计了低频在轨定标方案并利用其他卫星数据进行了验证。后续可在以下几个方面进行研究:

- (1) 外部杂散光是影响辐射定标精度的因素之一。热像仪仅对外部杂散光使用 `tracepro` 软件进行了仿真。为了验证杂散光抑制方案的有效性,还需要利用在轨观测数据进一步验证。
- (2) 红外相机在轨运行时,除了采用地物目标如海洋、湖泊等作为外部定标源进行交叉定标外,还可将交叉定标的观测目标扩展到恒星进行多相机间的交叉定标,实现高频次的交叉定标。恒星能量的高精度提取是实现高精度恒星定标的基础。后续会研究恒星目标能量与其在像面位置、像元内响应的关系,构建基于像元内响应的点目标能量修正方法。
- (3) 随着在轨运行时间的增加,黑体的辐射性能、仪器的响应特性如响应率、非均匀性、盲元等均会发生变化。在轨定标时,可以借助其他定标源如月球、恒星来对探测器性能如响应率进行长周期监测。此外,可在地面开展探测器稳定性测试,并对探测器的长周期性能、寿命进行预估。

参考文献

- [1] Chander G, Markham B L, Helder D L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors[J]. Remote Sensing of Environment, 2009, 113(5): 893-903.
- [2] Butler J J, Xiong X, Gu X, et al. Performance of the Thermal Infrared Sensor on-board Landsat 8 over the first year on-orbit[J]. 2014, 9218: 921817.
- [3] Meynart R, Xiong X, Neeck S P, et al. Terra and Aqua MODIS calibration algorithms and uncertainty analysis[J]. 2005, 5978: 59780V.
- [4] 王成刚, 东海杰, 刘泽巍, et al. "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, (3): 80-84.
- [5] 刘李, 顾行发, 余涛, et al. HJ-1B 卫星热红外通道在轨场地定标与验证[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(5): 1119-1119.
- [6] Cao C, Wang W, Blonski S, et al. Radiometric traceability diagnosis and bias correction for the Suomi NPP VIIRS long-wave infrared channels during blackbody unsteady states[J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2017, 122(10): 5285-5297.
- [7] 王猛猛. 地表温度与近地表气温热红外遥感反演方法研究[D]; 中国科学院大学(中国科学院遥感与数字地球研究所), 2017.
- [8] 孙珂, 陈圣波. 基于遗传算法综合 Terra/Aqua MODIS 热红外数据反演地表组分温度[J]. 红外与毫米波学报, 2012, (05): 462-468.
- [9] 张勇, 祁广利, 戎志国. 卫星红外遥感器辐射定标模型与方法[M]. 卫星红外遥感器辐射定标模型与方法, 2015.
- [10] 姜高珍, 韩冰, 高应波, et al. Landsat 系列卫星对地观测 40 年回顾及 LDCM 前瞻[J]. 遥感学报, 2013, 17(05): 1033-1048.
- [11] 张志杰, 张浩, 常玉光, et al. Landsat 系列卫星光学遥感器辐射定标方法综述[J]. 遥感学报, 2015, 19(05): 719-732.
- [12] 徐娜, 陈林, 胡秀清, 陆风. FY-2D 红外探测器窗区通道非线性特性及其定标订正方案[J]. 红外与毫米波学报, 2013, 32(04): 51-57.
- [13] Xuan G Q C B-Y Y C F. On-orbit radiometric calibration for water-vapor band of FY-2satellite[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2012, 31(06): 45-49.
- [14] 郭强, 陈博洋, 张勇, et al. 风云二号卫星在轨辐射定标技术进展[J]. 气象科技进展, 2013, 3(06): 6-12.
- [15] Jianmin X U Q G, Qifeng L U , et al. Innovations in the Data Processing Algorithm for Chinese FY Meteorological Satellites[J]. Jianmin X U , Qiang G , Qifeng L U , et al

- Innovations in the Data Processing Algorithm for Chinese FY Meteorological Satellites[J] 气象学报(英文版), 2014, 028(005):948-964, 028(005):
- [16] Harris A R, Mittaz J P D, Sullivan J T. A Physical Method for the Calibration of the AVHRR/3 Thermal IR Channels 1: The Prelaunch Calibration Data[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2009, 26(5): 996-1019.
- [17] Li Y, Xiong X, McIntire J, et al. Impact of Blackbody Warm-Up Cool-Down Cycle on the Calibration of Aqua MODIS and S-NPP VIIRS Thermal Emissive Bands[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2018, 56(4): 2377-2386.
- [18] Yu F, Wu X. Radiometric Calibration Accuracy of GOES Sounder Infrared Channels[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(3): 1187-1199.
- [19] Gu X, Xiong X, Butler J J, et al. Early radiometric calibration performances of GOES-16 advanced baseline imager[M]. Earth Observing Systems XXII. 2017.
- [20] Zhang Y, Zheng Z, Hu X, et al. Lake Qinghai: Chinese site for radiometric calibration of satellite infrared remote sensors[J]. Remote Sensing Letters, 2013, 4(4): 315-324.
- [21] Schott J R, Hook S J, Barsi J A, et al. Thermal infrared radiometric calibration of the entire Landsat 4, 5, and 7 archive (1982–2010)[J]. Remote Sensing of Environment, 2012, 122(Complete): 41-49.
- [22] Moyer D, Moeller C, Luccia F D. VIIRS thermal emissive bands on-orbit calibration coefficient performance using vicarious calibration results[J]. Proceedings of Spie the International Society for Optical Engineering, 2013, 8866:
- [23] Yu F, Wu X. Correction for GOES Imager Spectral Response Function Using GSICS. Part II: Applications[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(3): 1200-1214.
- [24] Wu X, Goldberg M D, Goldberg M, et al. Global space-based inter-calibration system (GSICS): a status report[M]. Atmospheric and Environmental Remote Sensing Data Processing and Utilization III: Readiness for GEOSS. 2007.
- [25] Wu X, Yu F. Correction for GOES Imager Spectral Response Function Using GSICS. Part I: Theory[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(3): 1215-1223.
- [26] 孙珂, 傅俏燕, 亓学勇. HJ-1B 卫星 IRS 传感器热红外通道交叉定标[J]. 红外与激光工程, 2010, 39(5):
- [27] Chang T, Xiong X. GOES-16/ABI Thermal Emissive Band Assessments Using GEO-LEO-GEO Double Difference[J]. Earth and Space Science, 2019, 6(12): 2303-2316.
- [28] Li Y, Xiong X, McIntire J, et al. Early Calibration and Performance Assessments of NOAA-20 VIIRS Thermal Emissive Bands[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(11): 9242-9251.
- [29] Liu W, Li J, Han Q, et al. Orbital Lifetime (2008–2017) Radiometric Calibration and Evaluation of the HJ-1B IRS Thermal Infrared Band[J]. Remote Sensing, 2020, 12(15): 2362.

- [30] McIntire J, Efremova B, Xiong X. Calibration of NPP VIIRS fire detection band using lunar observations[J]. *Proc Spie*, 2012, 8533(24): 2288-2291.
- [31] Yang A, Zhong B, Wu S, et al. Radiometric Cross-Calibration of GF-4 in Multispectral Bands[J]. *Remote Sensing*, 2017, 9(3):
- [32] Barsi J, Schott J, Hook S, et al. Landsat-8 Thermal Infrared Sensor (TIRS) Vicarious Radiometric Calibration[J]. *Remote Sensing*, 2014, 6(11): 11607-11626.
- [33] Zhang P, Zhu L, Tang S, et al. General Comparison of FY-4A/AGRI With Other GEO/LEO Instruments and Its Potential and Challenges in Non-meteorological Applications[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2019, 6:
- [34] Hewison T J, Wu X, Yu F, et al. GSICS Inter-Calibration of Infrared Channels of Geostationary Imagers Using Metop/IASI[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2013, 51(3): 1160-1170.
- [35] Liang X, Ignatov A, Kramar M, et al. Preliminary Inter-Comparison between AHI, VIIRS and MODIS Clear-Sky Ocean Radiances for Accurate SST Retrievals[J]. *Remote Sensing*, 2016, 8(3):
- [36] Bessho K, Date K, Hayashi M, et al. An Introduction to Himawari-8/9—Japan's New-Generation Geostationary Meteorological Satellites[J]. *Journal of the Meteorological Society of Japan Ser II*, 2016, 94(2): 151-183.
- [37] Karafolas N, Sodnik Z, Cugny B, et al. The FCI on board MTG : optical design and performances[M]. *International Conference on Space Optics — ICSO 2014*. 2017.
- [38] Chang T, Xiong X, Butler J J, et al. Assessment of GOES-16/ABI middle wave infrared band using references of Himawari-8/AHI and Aqua/MODIS[M]. *Earth Observing Systems XXIV*. 2019.
- [39] Xiaoxiong X, Wenny B N, Aisheng W, et al. MODIS Onboard Blackbody Function and Performance[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(12): 4210-4222.
- [40] Xiaoxiong Xiong W B. An Overview of MODIS Radiometric Calibration and Characterization[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2006, 23(1):
- [41] Xiong X J, Kuriakose S A, Kimura T, et al. Himawari-8/AHI latest performance of navigation and calibration[M]. *Earth Observing Missions and Sensors: Development, Implementation, and Characterization IV*. 2016.
- [42] Da C. Preliminary assessment of the Advanced Himawari Imager (AHI) measurement onboard Himawari-8 geostationary satellite[J]. *Remote Sensing Letters*, 2015, 6(8): 637-646.
- [43] Xiong X, Wenny, Brian N, et al. Aqua MODIS Thermal Emissive Band On-Orbit Calibration, Characterization, and Performance[J]. *IEEE Transactions on Geoscience & Remote Sensing*, 2009:
- [44] Butler J J, Moeller C C, Xiong J, et al. Assessing MODIS LWIR band calibration accuracy[J]. 2006, 6296: 62960B.

- [45] Xiong X, Wenny B, Sun J, et al. Status of MODIS on-orbit calibration and characterization; proceedings of the Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XVII, F, 2013 [C].
- [46] Xiong X, Wenny B, Sun J, et al. Status of Aqua MODIS on-orbit calibration and characterization[J]. Proc Spie, 2013, 8889(6): 4128 - 4131.
- [47] Barnes W L, Chiang K-F, Butler J J, et al. MODIS thermal emissive bands calibration uncertainty analysis[J]. 2004, 5542: 437.
- [48] Tsay S C, Xiong X, Yokota T, et al. On-orbit characterization of RVS for MODIS thermal emissive bands[J]. 2004, 5652: 210.
- [49] Butler J J, Xiong X, Gu X, et al. Evaluation of Terra and Aqua MODIS thermal emissive band response versus scan angle[J]. 2014, 9218: 92181L.
- [50] Xiong X J, Chiang K, Guenther B, et al. MODIS Thermal Emissive Bands Calibration Algorithm and On-orbit Performance; proceedings of the Optical Remote Sensing of the Atmosphere and Clouds III, F, 2003 [C].
- [51] Madhavan S, Xiong X, Wu A, et al. Noise Characterization and Performance of MODIS Thermal Emissive Bands[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 2016, 54(6): 3221-3234.
- [52] Butler J J, Xiong X, Xiong J, et al. Detector noise characterization and performance of MODIS thermal emissive bands[J]. 2007, 6677: 66770L.
- [53] Xiong X, Butler J J, Chen H, et al. Using lunar observations to assess Terra MODIS thermal emissive bands calibration[J]. 2010, 7807: 78070I.
- [54] 牛明慧. 光学遥感仪器月球定标技术研究[D]; 中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所), 2018.
- [55] Junqiang S, Xiao X, Madhavan S, et al. Terra MODIS Band 27 Electronic Crosstalk Effect and Its Removal[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(3): 1551-1561.
- [56] Wilson T, Wu A, Shrestha A, et al. Development and Implementation of an Electronic Crosstalk Correction for Bands 27–30 in Terra MODIS Collection 6[J]. Remote Sensing, 2017, 9(6):
- [57] Xiaoxiong, Xiong, Kwo-Fu, et al. Multiyear On-Orbit Calibration and Performance of Terra MODIS Thermal Emissive Bands[J]. Geoscience & Remote Sensing IEEE Transactions on, 2008:
- [58] Butler J J, Wang Z, Xiong X, et al. Monitoring and assessment of the temperature fluctuation of Aqua MODIS cold focal plane assembly[J]. 2012, 8510: 85100K.
- [59] Butler J J, Xiong X, Xiong J, et al. Results and lessons from MODIS thermal emissive bands calibration: pre-launch to on-orbit[J]. 2006, 6296: 62960A.
- [60] Wenny B, Helder D, Hong J, et al. Pre- and Post-Launch Spatial Quality of the Landsat 8 Thermal Infrared Sensor[J]. Remote Sensing, 2015, 7(2): 1962-1980.
- [61] Reuter D, Richardson C, Pellerano F, et al. The Thermal Infrared Sensor (TIRS) on Landsat 8: Design Overview and Pre-Launch Characterization[J]. Remote Sensing, 2015, 7(1):

- 1135-1153.
- [62] Andresen B F, Jhabvala M, Fulop G F, et al. The QWIP focal plane assembly for NASA's Landsat Data Continuity Mission[J]. 2010, 7660: 76603J.
- [63] Andresen B F, Jhabvala M, Fulop G F, et al. Performance of the QWIP focal plane arrays for NASA's Landsat Data Continuity Mission[J]. 2011, 8012: 80120Q.
- [64] Otero V, Mosier C, Neuberger D. Thermal Infrared Sensor (TIRS) Instrument Thermal Subsystem Design and Lessons Learned; proceedings of the 43rd International Conference on Environmental Systems, F, 2013 [C].
- [65] Montanaro M. Dark and background response stability for the Landsat 8 Thermal Infrared Sensor; proceedings of the Spie Optical Engineering + Applications, F, 2012 [C].
- [66] Pearlman A, Montanaro M, Efremova B, et al. Prelaunch Radiometric Calibration and Uncertainty Analysis of Landsat Thermal Infrared Sensor 2[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020: 1-12.
- [67] K. Thome¹ D R, A. Lunsford², M. Montanaro³, R. Smith¹, Z. Tesfaye⁴, B. Wenny. Calibration of the thermal infrared sensor on the landsat data [J].
- [68] Thermal Infrared Sensor TIRS Design and Status[M]. Landsat Science Team Meeting. 2009.
- [69] Meynart R, Neeck S P, Shimoda H, et al. Landsat 8: status and on-orbit performance[J]. 2015, 9639: 963908.
- [70] Ientilucci E J, Raqueno N G, Schott J R, et al. Landsat 8 TIRS calibration with external sensors; proceedings of the Earth Observing Systems XXII, F, 2017 [C].
- [71] Butler J J, Xiong X, Gu X, et al. Performance of the proposed stray light correction algorithm for the Thermal Infrared Sensor (TIRS) onboard Landsat 8[J]. 2016, 9972: 99720F.
- [72] Gerace A, Montanaro M. Derivation and validation of the stray light correction algorithm for the thermal infrared sensor onboard Landsat 8[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 191: 246-257.
- [73] Montanaro M, Gerace A, Rohrbach S. Toward an operational stray light correction for the Landsat 8 Thermal Infrared Sensor[J]. Applied Optics, 2015, 54(13): 3963.
- [74] McCorkel J M M, Efremova B, et al. . Landsat 9 Thermal Infrared Sensor 2 Characterization Plan Overview[J]. IGARSS 2018-2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IEEE, 2018: , 2018: 8845-8848.
- [75] Joel McCorkel M M, June Tveekrem, John Stauder, Allen Lunsford, Eric Mentzell, Jason Hair, Dennis Reuter Landsat 9 Thermal Infrared Sensor 2 stray light assesment[J].
- [76] Czapla-Myers J S, Anderson N J, Butler J J, et al. Intercomparison of the GOES-16 and -17 Advanced Baseline Imager with low-Earth orbit sensors[M]. Earth Observing Systems XXIV. 2019.
- [77] Schmit T J G M M, Li J, et al. Introducing Datasets for Next Generation Geostationary Imager Compression[J]. Satellite Data Compression, Communications, and Archiving II International Society for Optics and Photonics, 2006, 6300: 63000P:

- [78] Schmit T J, Griffith P, Gunshor M M, et al. A Closer Look at the ABI on the GOES-R Series[J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2017, 98(4): 681-698.
- [79] Xiong X J, Kuriakose S A, Kimura T, et al. Post launch calibration and testing of the Advanced Baseline Imager on the GOES-R satellite[M]. Earth Observing Missions and Sensors: Development, Implementation, and Characterization IV. 2016.
- [80] Xiangqian W Y F, Kondratovich V, et al. . Evaluation of GOES-16 ABI on-orbit performance using GSICS[J]. IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2017: 305-307.
- [81] Meynart R, Neeck S P, Shimoda H, et al. The GOES-R Advanced Baseline Imager: detector spectral response effects on thermal emissive band calibration[M]. Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites XIX. 2015.
- [82] Yu F, Wu X, Yoo H, et al. Radiometric calibration performance of GOES-17 Advanced Baseline Imager (ABI)[M]. Earth Observing Systems XXIV. 2019.
- [83] 孙志远, 王旻, 常松涛. 环境温度对红外辐射测量精度的影响及修正[J]. 激光与红外, 2014, 44(05): 522-527.
- [84] Lightsey P A, Wei Z, Skelton D L, et al. Stray light performance for the James Webb Space Telescope; proceedings of the Spie Astronomical Telescopes + Instrumentation, F, 2014 [C].
- [85] 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(009): 535-540.
- [86] Patterson B A, Wells M. Analysis of scattered light for VISTA[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2003, 350(3): 213-215.
- [87] Zhu Y, Zhang X, Liu T, et al. Internal and external stray radiation suppression for LWIR catadioptric telescope using non-sequential ray tracing[J]. Infrared Physics & Technology, 2015, 71: 163-170.
- [88] Wang Y, Du B, Bentley J, et al. Several factors affecting self-thermal radiation of cryogenic infrared optical system[J]. 2010, 7849: 78490F.
- [89] Jiang W, Yao X, Cho M K, et al. Path analysis and suppression of self-generated thermal emission in infrared optical systems[J]. 2010, 7654: 76540U.
- [90] Pravdivtsev A V, Akram M N. Simulation and assessment of stray light effects in infrared cameras using non-sequential ray tracing[J]. Infrared Physics & Technology, 2013, 60: 306-311.
- [91] Angeli G Z, Dierickx P, Zheng J R, et al. Antarctic Surveying Telescope (AST3-3) NIR camera for the Kunlun Infrared Sky Survey (KISS): thermal optimization and system performance[J]. 2016, 9911: 99111H.
- [92] 李岩, 刘剑峰. 红外光学传感器内杂散光和外杂散光的综合抑制研究[J]. 光学学报, 2013, 33(09): 285-289.
- [93] 朱杨. 空间光学系统杂散辐射抑制研究[D]; 中国科学院研究生院(长春光学精密机械与

- 物理研究所), 2016.
- [94] 朱杨, 张新, 伍雁雄, et al. 离轴反射式空间天文望远系统设计及其杂散光抑制研究[J]. 光学学报, 2014, 34(08): 234-240.
- [95] Songtao C, Yaoyu Z, Zhiyuan S, et al. Method to remove the effect of ambient temperature on radiometric calibration[J]. Appl Opt, 2014, 53(27): 6274-6279.
- [96] Tian Q, Chang S, He F, et al. Internal stray radiation measurement for cryogenic infrared imaging systems using a spherical mirror[J]. Applied Optics, 2017, 56(17): 4918.
- [97] Tian Q, Chang S, Li Z, et al. A method to measure internal stray radiation of cryogenic infrared imaging systems under various ambient temperatures[J]. Infrared Physics & Technology, 2017, 81: 1-6.
- [98] 田棋杰. 红外经纬仪内部杂散辐射分析抑制与测量技术研究[D]; 中国科学院大学(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所), 2018.
- [99] Chang T, Cao C. Modeling Infrared Radiometer Self-Emission With Application to MetOp/HIRS[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2014, 52(6): 3141-3149.
- [100] Meynart R, Chang T, Neeck S P, et al. Analysis of MetOp/HIRS instrument self-emission and its impact on on-orbit calibration[J]. 2011, 8176: 81760X.
- [101] Strojnik M, Battles D, Paez G, et al. The evolution of the performance of the AVHRR, HIRS, and AMSU-A instruments on board MetOp-A after over three years in orbit[J]. 2010, 7808: 780811.
- [102] Cao C, Jarva K, Ciren P. An Improved Algorithm for the Operational Calibration of the High-Resolution Infrared Radiation Sounder[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2007, 24(2): 169-181.
- [103] Liu Q, Chiang K V, Cao C, et al. Calibration of low gain radiance at VIIRS emissive band (M13) and VIIRS image about moon temperature[J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2012, 8528: 429-446.
- [104] Linsky J L. The Moon as a Proposed Radiometric Standard for Microwave and Infrared Observations of Extended Sources[J]. Astrophysical Journal Supplement, 1973, 25:
- [105] Salisbury J W, Basu A, Fischer E M. Thermal Infrared Spectra of Lunar Soils[J]. Icarus, 1997, 130(1): 125-139.
- [106] Shaw J. Modeling infrared lunar radiance[J]. Optical Engineering, 1999, 38(10): 1763-1764.
- [107] Yamamura I. ASTRO-F: Mission Overview and the Calibration Strategy[J]. 'the calibration legacy of the iso mission', 2003:
- [108] Stone R. Spectrophotometry of Flux Calibration Stars for Hubble Space Telescope[J]. Astrophysical Journal Supplement, 1996, 107(1): 423.
- [109] Egan M P, Price S D, Moshir M M, et al. The Midcourse Space Experiment Point Source Catalog Version 2.3[J]. Bulletin of the American Astronomical Society, 1999:

- [110] 张婉莹, 王涛, 陈凡胜. 星上定标的观测恒星确定方法研究[J]. 中国空间科学技术, 2017, 37(03): 71-76.
- [111] Landsat 9 Thermal Infrared Sensor 2 Subsystem-Level Spectral Test Results; proceedings of the IGARSS 2018 - 2018 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, F, 2018 [C].
- [112] 张小倩, 周翠. 红外探测器相对光谱响应测试[J]. 红外, 2020, (6): 1-6.
- [113] 陈亚卓, 秦玉伟. 红外探测器光谱响应测量研究[J]. 河南科学, 2013, 031(001): 28-30.
- [114] Konnik M, Welsh J. High-level numerical simulations of noise in CCD and CMOS photosensors: review and tutorial[J]. Computer Science, 2014:
- [115] McIntire J, Moyer D, Oudrari H, et al. Pre-launch Radiometric Characterization of JPSS-2 VIIRS Thermal Emissive Bands[J]. Remote Sensing, 2019, 11(6): 732.
- [116] Xiaoxiong X, Aisheng W, Wenny B N, et al. Terra and Aqua MODIS Thermal Emissive Bands On-Orbit Calibration and Performance[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2015, 53(10): 5709-5721.
- [117] 宋天明, 李三伟, 易荣清, et al. 蒙特卡罗采样法辐射温度测量不确定度分析[J]. 强激光与粒子束, 2012, 24(010): 2351-2354.
- [118] 杜福洲, 王怀. 激光跟踪仪现场测点不确定度建模及试验分析[J]. 制造业自动化, 2013, 35(003): 23-26.
- [119] 邓湘金, 郭强, 饶炜. 月球探测器 TDI-CCD 相机成像质量影响因素分析[J]. 航天器工程, 2010, 19(005): 70-75.
- [120] 华桦. 中短波红外焦平面探测器暗电流测试分析及相关性能研究[D]; 中国科学院研究生院(上海技术物理研究所), 2014.
- [121] Rogalski A, Sizov F F, Dereniak E L, et al. Temperature dependence of the dark current in HgCdTe photodiode arrays[J]. 2005, 5957: 59571L.
- [122] 金和, 任栖锋, 陈为. 窗口自发辐射对于红外探测器系统性能的影响[J]. 光电工程, 2016, 43(08): 84-88.
- [123] 王俊. 碲镉汞红外探测器光电响应特性的机理研究[D]; 中国科学技术大学, 2012.
- [124] 王溪. 12.5 μm 长波碲镉汞红外探测器制备与表征[D]; 中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所), 2018.
- [125] 王鹏, 何家乐, 许娇, et al. MMVCX 光伏型 HgCdTe 中波探测器暗电流温度特性[J]. 红外与毫米波学报, 2017, 36(03): 289-294.
- [126] 岳婷婷, 殷菲, 胡晓宁. 硅基 HgCdTe 光伏器件的暗电流特性分析[J]. 激光与红外, 2007, (S1): 931-934.
- [127] Butler J J, Xiong X, Gu X, et al. Characterization of Himawari-8 AHI 3.9- μm channel stray light[M]. Earth Observing Systems XXI. 2016.
- [128] Shao X W X, Yu F. . Stray light performance comparison between Himawari-8 AHI and

- GOES-16 ABI[J]. 2017 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2017: 286-289.
- [129] Montanaro M, Lunsford A, Tesfaye Z, et al. Radiometric Calibration Methodology of the Landsat 8 Thermal Infrared Sensor[J]. Remote Sensing, 2014, 6(9): 8803-8821.
- [130] Fan L, 李凡, Yang Y, et al. 基于蒙特卡洛的红外光学系统杂散辐射分析; proceedings of the 航天系统仿真重点实验室;系统仿真学报, F, 2016 [C].
- [131] 牛金星, 周仁魁, 刘朝晖, et al. 红外探测系统自身热辐射杂散光的分析[J]. 光学学报, 2010, 30(008): 2267-2271.
- [132] 张葆, 洪永丰, 史光辉. 非均匀性校正红外杂散辐射抑制中的应用[J]. 光学精密工程, 2008, 16(012): 2421-2428.
- [133] Dong Z, 赵东, Huixin Z, et al. 基于局部梯度统计特性的红外焦平面盲元补偿算法; proceedings of the 陕西省物理学会, F, 2015 [C].
- [134] 陈苏婷, 孟浩, 杨世洪, et al. 基于混合自适应回归的红外盲元补偿算法[J]. 计算机辅助设计与图形学学报, 2015, 04(4): 651-651.
- [135] 崔坤, 陈凡胜, 苏晓锋, et al. 红外焦平面探测器响应率不稳定像元快速筛选方法[J]. 红外技术, 2017, (2):
- [136] 崔坤. 静止轨道超大规模凝视型相机信息处理技术研究[D]; 中国科学院大学(中国科学院上海技术物理研究所).
- [137] 孟思岐, 任侃, 路东明, et al. 一种基于恒定统计的红外图像非均匀性校正算法[J]. 应用光学, 2017, 38(02): 304-308.
- [138] 李谦, 杨波, 栗宇路, et al. 基于神经网络的红外焦平面光学非均匀性校正改进算法[J]. 红外技术, 2019, 41(03): 251-255.
- [139] 刘永进, 张国华, 赵亦工. 混合卡尔曼滤波的非均匀校正算法[J]. 西安电子科技大学学报, 2012, 39(06): 195-200.
- [140] 于海涛, 马金鹏, 范芸, et al. 红外成像系统响应光谱非均匀性的理论分析[J]. 红外与激光工程, 2019, 48(02): 75-81.
- [141] 黄宇, 张宝辉, 吴杰, et al. 自适应多点定标非均匀性校正算法[J]. 红外技术, 2020, 42(07): 637-643.
- [142] 白乐, 赖雪峰, 韩维强, et al. 适应积分时间调整的红外图像非均匀性校正方法[J]. 光子学报, 2020, 49(01): 175-183.
- [143] Butler J J, Xiong X, Gu X, et al. Detector level ABI spectral response function: FM4 analysis and comparison for different ABI modules[M]. Earth Observing Systems XXI. 2016.
- [144] Wang Z, Cao C. Assessing the Effects of Suomi NPP VIIRS M15/M16 Detector Radiometric Stability and Relative Spectral Response Variation on Striping[J]. Remote Sensing, 2016, 8(2): 145.

- [145] 方匡南, 吴见彬, 朱建平, et al. 随机森林方法研究综述[J]. 统计与信息论坛, 2011, 26(003): 32-38.
- [146] 李欣海. 随机森林模型在分类与回归分析中的应用[J]. 应用昆虫学报(昆虫知识), 2013, 50(004): 001190-001197.
- [147] 严智, 张鹏, 谢川, et al. 一种快速 AdaBoost.RT 集成算法时间序列预测研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2019, (6):

致 谢

转眼间，在中国科学院上海技术物理研究所的五年求学之路已经要画上句号，5年的点点滴滴仿佛还在昨天。

首先，我想要郑重感谢我的导师陈凡胜研究员，感谢陈老师在求学期间对我的耐心指导和悉心关怀。陈老师虽然项目多、工作压力大，但对课题组中的每个学生都很认真负责。在学习遇到瓶颈时，陈老师总会帮我梳理思路，给出深入准确的建议，并一直给予我鼓励。从论文的选题到论文的撰写和定稿，完成的整个过程中都渗透着您的心血和汗水。

陈老师既是良师又是益友。您对学术的精益求精、谨慎细致、刨根问底的精神一直是我学习的榜样。在五年的求学生涯里，从陈老师这里不仅学到了专业知识，还学到了为人处世、高效做事、拒绝拖延、遇到困难积极应对不放弃、对待工作认真负责的态度和方法。感谢陈老师无私的分享自己在成长过程中踩过的坑，并为我指明前进方向，让我少走弯路。谆谆如父语，殷殷似友亲。

感谢学生辅导员陈福春老师，感谢徐英会、张帆，研究生部的汪骏发、李淑微、朱晓琳、黄曦老师，感谢你们在我研究生生涯给予的帮助和支持。

感谢同课题组的职工在工作和学习中给予的帮助和鼓励，他们深厚的专业知识，谦逊的为人和热情的帮助使我感触颇深，受益匪浅。感谢王敏敏、吕凭乐、杨敏珠、牛明慧、崔坤、王誉都、李凯等师姐师兄，感谢一起求学陪伴的李潇雁、倪歆玥、孙莹莹、李文力、刘会凯、张悦、雷林建，感谢同课题组的钟篱、余书田、李俊辰、朱敏、陈周霞、李丽圆、江林逸、周晓萱等师弟师妹，感谢 46201 的小伙伴们，我们一起在 46201 度过了一段快乐的时光。

感谢某位远在边疆保卫祖国的人民战士的网路陪伴，你的安慰和陪伴总能让我安心。感谢李博士、朱博士的网路陪伴，我们从高中一路走来，从一起入学时的无忧无虑到易燃易爆炸，再到临近毕业压力山大、远程抱头痛哭，但我们一直互相鼓励，一起努力的感觉真好。感谢陪伴我的好闺蜜从青春期到现在的陪伴，我们胜似亲姐妹。有你们的陪伴真好！祝友谊长存！

感谢我的父母 26 年来对我的养育，感谢你们一直以来的为我提供的帮助和支持，你们的关怀与期待一直是我学习工作的强大动力和坚强后盾。

最后感谢各位评审老师和答辩老师,感谢你们在百忙之中为本文提出的宝贵意见。

2021 年 6 月

作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与研究成果

作者简历:

2012 年 8 月——2016 年 6 月, 在电子科技大学光电信息学院获得学士学位。

2016 年 8 月——2021 年 6 月, 在中国科学院上海技术物理研究所攻读博士学位。

获奖情况:

- (1) 2017、2018 年度、2020 年度上海技术物理研究所三等奖;
- (2) 2017 年度所三好学生;
- (3) 2018 年度上海技术物理研究所优秀班干部;
- (4) 2018 年“华为杯”15 届中国研究生数学建模竞赛二等奖;
- (5) 2018、2019 年度中国科学院大学三好学生;
- (6) 2019 年度上海技术物理研究所一等奖学金;
- (7) 2019 年度博士研究生国家奖学金。

工作经历:

无

已发表(或正式接受)的学术论文:

1. **Hu Z**, Su X, Li X, et al. A method for the characterization of intra-pixel response of infrared sensor[J]. Optical and quantum electronics, 2019, 51(3):74.1-74.7.
2. **胡瑄悦**, 周晓东, 唐玉俊,等. 一种前照式 CMOS 探测器像元内响应测量和解算方法[J]. 中国激光, 2019, v.46;No.513(09):275-279.
3. **Hu Z**, Hei H, Li X, et al. Modeling background response and applications for mid-infrared remote sensing camera[J]. Infrared Physics & Technology, 2019, 103: 103082.
4. Li X, **Hu Z**, Jiang L, et al. GCPs Extraction With Geometric Texture Pattern for Thermal Infrared Remote Sensing Images[J]. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 2020.
5. Li X, Su X, **Hu Z**, et al. Improved Distortion Correction Method and Applications for Large Aperture Infrared Tracking Cameras[J]. Infrared Physics & Technology, 2019, 98:82-88.

6. Li X , Yang L , Su X , **Hu Z** et al. A Correction Method for Thermal Deformation Positioning Error of Geostationary Optical Payloads[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2019, 57(10):7986-7994.

申请或已获得的专利:

1. 陈凡胜, 胡琯悦, 孙小进. 基于双镜头与面阵拼接的广域宽覆盖探测系统的拼接结构, CN108593107A[P]. 2018.(发明专利已授权)
2. 陈凡胜, 胡琯悦, 杨林,等. 一种多相机凝视探测系统及成像拼接方法, CN107734220A[P]. 2018. (已申请)