

真空低温高灵敏度中红外辐射计

孙景旭, 费强, 谢虹波, 王硕, 谢新旺

(季华实验室, 广东佛山 528200)

摘要: 为精确地评估真空低温状态下大面积黑体辐射源的均匀性, 设计了高灵敏度中波红外辐射计。给出了辐射校准的物理模型, 详细分析了目标温度 200 K 和 213 K 的信噪比, 得到真空低温下 200 K 和 213 K 目标信噪比分别为 460 倍和 1 492 倍。设计了高信噪比测量 200 K 目标的总体方案, 研制了高灵敏度真空低温环境下使用的中红外辐射计。采用透射式光学系统及温度系数匹配稳定的高刚性光机支撑结构, 满足真空低温的环境条件。采用外置黑体标定中红外辐射计的温度/辐射响应度, 创新性采用调制器兼顾内置定标辐射源, 采用四级 TE 制冷中红外探测单元, 配合高性能探测单元及 80 倍动态范围的同步积分锁相放大器, 获取大占空比的高质量方波信号用于辐射计算。实验结果表明: 在温度 77 K、真空度 1×10^{-5} Pa 真空低温环境下, 测试 213 K 目标黑体辐射源, 1 h 内的信号不稳定性为 0.24%; 噪声等效温差 (NETD) 值为 0.034 K; 测量精度优于 2%。中红外辐射计满足真空低温环境下高精度测试微弱目标的要求。

关键词: 中红外波段; 高精度; 真空低温; 绝对辐射量值; 高刚性

中图分类号: O432; TP732

文献标志码: A

DOI: 10.3788/IRLA20230136

0 引言

随着红外技术的发展, 红外波段探测器被广泛地应用于军事、工业、农业、航天等领域, 红外探测技术的应用已经扩展至临近空间以及外太空, 主要用于红外遥感系统、空间侦查系统、临近空间预警系统以及深空探测等方面。特别是在航天领域, 越来越多的红外通道传感器被送入太空。红外传感器^[1]能否获取有价值的数据与其精确的红外辐射测量能力有关, 需要对红外传感器发射前绝对定标^[2]。红外辐射定标是红外遥感信息定量化^[3]的关键技术之一。红外载荷的光学口径越来越大以满足更高分辨率的应用需求, 超大口径的红外辐射源可以模拟红外载荷在轨观测的目标, 如对地建筑物、自然景观、临近空间飞行器、空间卫星、空间站、深空星体等。这些目标的红外辐射能量非常微弱, 在常温环境下, 微弱的红外目标辐射会被杂散辐射和光学系统自身热辐射所淹没, 无法提供给红外载荷探测目标的真实辐射。为此, 在真空

低温环境下采用近距离扩展源的方法对超大口径红外载荷定标, 准确掌握红外载荷的各项性能指标, 保证其性能指标达到预先设计值。超大口径红外辐射源的辐射/温度均匀性直接影响定标和校准精度, 采用红外辐射计对其进行测试, 并评价辐射/温度均匀性, 工作环境与在轨空间环境一致, 即真空低温环境。目前, 通常采用一系列 200~500 K 腔体温度的黑体定标中波红外波段 (2~5 μm) 的传感器。

深空探测领域使用高灵敏度探测功能的设备观测各类天体辐射, 获取被观测天体的红外辐射强度; 地球观测领域使用太阳辐射观测仪、偏振遥感器等设备, 观测分析地球气候变化和环境保护, 获取被测目标的辐射特性; 红外制导领域采用目标模拟设备向制导导弹提供精确的红外辐射信息, 提高导弹制导的效果^[4]。以上各个领域直接或间接地对红外辐射提出了高精度测试的需求, 追根溯源是对红外辐射测量仪器提出了高精度测量的要求。

美国国家标准与技术研究院 (NIST) 等机构的低

收稿日期: 2023-03-13; 修订日期: 2023-06-06

基金项目: 广东省重点领域研发计划资助项目 (2018B030328001)

作者简介: 孙景旭, 男, 副研究员, 博士, 主要从事空间光学传感器光机结构和辐射定标方面的研究。

温红外探测技术属于世界领先水平。NIST 设计的 BXR 可以实现在 2~30 μm 范围内测量低至 10⁻¹⁵ W/cm² 的辐照度水平,可以在低于 20 K 的低温真空室的温度下工作。美国犹他州立大学设计的红外辐射计系统工作温度为 85 K,可以探测 2~5 μm 的中红外波段。NASA 研制的 AEOS 辐射计系统为一个四通道的辐射计,提供覆盖 0.39~23 μm 的光辐射测量数据。其所有反射和折射光学元件均工作在 60 K^[5]。

德国 HEITRONICS 的 TRT 4.82 被用作绝对温度的传递介质,工作温度为 250 K,工作波段为 8~14 μm,可探测 223~573 K 温度的目标,不稳定性优于 0.5%/h,不能在真空低温环境下使用。西安立鼎光电科技有限公司的 RLK603,工作波段为 2~5 μm,可探测 800~2 000 K 温度的目标,不稳定性为 3%/h,测量不稳定性在 5% 以内,不能在真空低温环境下使用。北京振兴计量测试研究所邱超设计的真空低温辐射计,工作波段为 8~12 μm,可探测 198~423 K 温度的目标,测量不稳定性在 5% 以内^[5]。

红外辐射面源应用于特定红外特性目标的模拟,红外目标面源的辐射性能基本取决于面源温度场的控制,红外辐射面源出射面的均匀性直接影响最终红

外遥传感器的定标精度。为了更好地抑制背景噪声,采用低温干燥或真空的测试环境,提高红外波段遥传感器的绝对辐射量值的传递和校准的精度。为了更好地评价真空低温^[6]状态下红外辐射面源出射面的均匀性^[7],研究真空低温中红外辐射计具有重要的理论和工程意义。

1 组成及其工作原理

1.1 系统组成

图 1 为红外辐射计系统的原理图。它主要由光学系统、光机结构、内、外定标器、红外探测器、前置宽带放大器,锁相放大器、调制器、计算机和软件组成。调制器放置在光学成像系统的焦面处,调制待测目标辐射源的信号,调制直流辐射产生同步信号,探测器采用 MCT 四级电制冷探测器,前置放大器将放大后的信号输出给锁相放大器,通过锁相放大器处理输出,通讯接口电路将模数转换的数据传输到计算机内进行辐射数据处理。控制调制器 PID 的精细热控,温度稳定的调制器叶片可作为内定标辐射源简化光路,外部黑体辐射源标定红外辐射计绝对辐射量值实现在线实时定标。

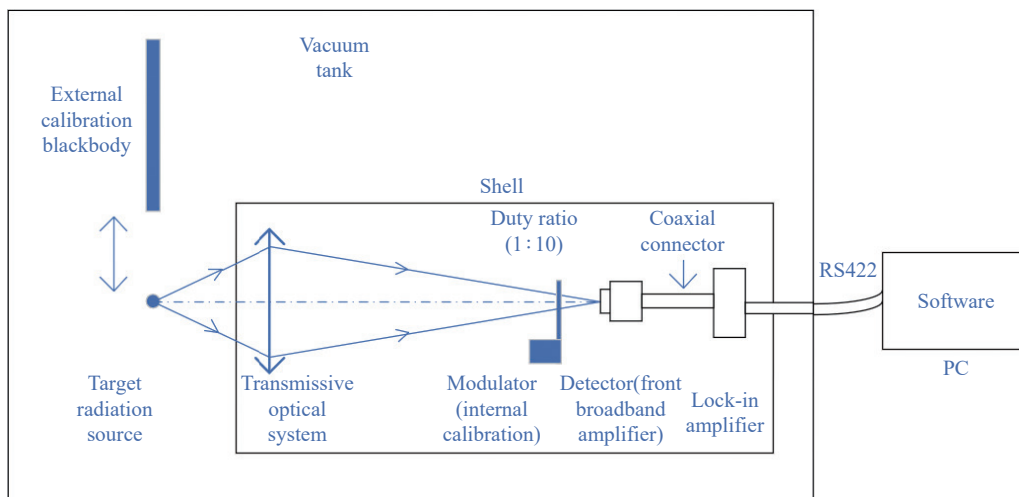


图 1 中红外辐射计原理图

Fig.1 Schematic diagram of the mid-infrared radiometer

1.2 测量原理

系统基本工作原理为:采用非球面锗镜作为成像透镜,调制扇放置到成像位置处,对成像光斑进行调制,后置探测器尽量靠近调制扇处。调制扇采用主动

和被动结合的热控手段,通过热辐射提高调制扇温度。外置黑体为一个面型黑体,校准后表面光谱辐射亮度数据已知,利用外置黑体定标内定标辐射系统的温度、辐射亮度和辐射计的响应度。当调制扇达到温

度稳定后,探测器输出信号 DN_B 为:

$$DN_B = L_B \times R_D \quad (1)$$

式中: R_D 为探测器及后续电路总的辐射亮度响应度; L_B 为稳定后调制扇辐射亮度。

当调制扇离开探测器,外置黑体辐射通过光学系统照明探测器时,探测器的输出 DN_C 为:

$$DN_C = T_0 \times L_C \times R_D \quad (2)$$

式中: L_C 为外置校准后的面型黑体辐射亮度; T_0 为光学系统的透过率。由于锁相放大器的输出为 DN_B 和 DN_C 两者的差值 (ΔDN_C),因此得到辐射计的响应度 R_r 为:

$$DN_C = L_C \times R_r = \Delta DN_C + DN_B \quad (3)$$

$$R_r = \frac{\Delta DN_C + DN_B}{L_C} \quad (4)$$

改变外置黑体的工作温度,辐射亮度输出为 L_{C-1} , L_{C-2} , ..., L_{C-n} ,可以解出公式(4)中的 DN_B 或响应度 R_r 。

定标后的测试过程中光学系统的透过率 T_0 没有变化,被测目标辐射亮度为 L_t ,辐射计的响应输出用 DN_t 表示,根据辐射响应关系,由公式(3)得:

$$DN_t = L_t \times R_r \quad (5)$$

锁相放大输出为调制扇背景辐射与信号辐射信号的差值 ΔDN_t 为:

$$\Delta DN_t = L_t \times R_r - DN_B \quad (6)$$

根据公式(3)和(4)解出被测辐射亮度 L_t 为:

$$L_t = \frac{(\Delta DN_t + DN_B)}{R_r} = \frac{\Delta DN_t - \Delta DN_C}{R_r} + L_C \quad (7)$$

公式(7)为最终辐射校准的计算方程,考虑到调制扇温度变化导致辐射亮度变化 L_B 或 DN_B 引入的测量误差,监控调制器温度并对不同温度的 L_B 或 DN_B 进行定标,获得相关数据。

2 中红外辐射计的研制

2.1 信噪比分析

辐射源:温度 $T=213$ K,测量距离 $L=1.5$ m;光学系统:直径 $D_0=80$ mm(直径);焦距 $f_0=124.8$ mm ($D/f=1/1.56$),光学系统透过率 $T_0=0.8$;探测器: $d=2$ mm; $D^*=10^{11}$ cm·Hz^{1/2}·W⁻¹。

根据 Planck 理论,2~5 μm 波段内, $T=213$ K 的黑体辐射输出辐射亮度为: $L_B=0.024$ W·m⁻²·sr⁻¹。

进入到光学入瞳内的辐射通量 H 为:

$$H = L_B \cdot \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{D_0}{f_0}\right)^2 \cdot T_0 \cdot A_d \quad (8)$$

将数据代入公式(8)得到:

$$H = 1.94 \times 10^{-8} \text{ W} \quad (9)$$

根据 D^* 的定义,计算噪声等效光功率 (NEP) 为:

$$NEP = \frac{\sqrt{A_d \times \Delta f}}{D^*} = 1.3 \times 10^{-11} \text{ W} \quad (10)$$

计算结果表明,213 K 目标黑体入射到探测器的辐射功率为 1.94×10^{-8} W,远大于探测的噪声等效光功率 1.3×10^{-11} W,信噪比为二者比值:

$$\frac{H}{NEP} = 1492 \quad (11)$$

同理,计算 200 K 目标的信噪比为 460 倍,高灵敏度主要是针对真空低温下目标温度 200 K 辐射源的测试需求,200 K 和 213 K 目标在 2~5 μm 的辐射出射度仅为 0.067 W/m² 和 0.162 W/m²,如何更好地测试与评价低温辐射源目标,需要辐射计具有更好的辐射灵敏度和稳定性,按照辐射校准的物理模型,分析真空低温下目标温度 200 K 和 213 K 的信噪比分别为 460 倍和 1492 倍。辐射计满足真空低温环境下 213 K 和 200 K 目标高信噪比的测量要求。仅分析探测器的理论信噪比,辐射计信噪比的贡献还包括处理电路、采集电路、光路噪声等,在设计上采用四级 TE 制冷、低噪声直流感应器和宽带锁相放大器,抑制信号处理电路的噪声,确保真空低温环境下测量 200~500 K 目标辐射源的信噪比优于 100。

2.2 总体设计要求和设计方案

中红外辐射计总体设计上从使用环境、高信噪比测量及宽域温场保障几个方面来考虑:1) 应对真空低温的环境条件,设计上分析环境对光学系统的影响,采用适配的光机结构材料保障光学系统的温度稳定性和结构刚度,确保辐射计光学镜片和高刚性结构稳定的环境适应性;2) 根据测量目标辐射源的辐射特性,设计上确保采用大相对孔径光学系统匹配低噪声宽带放大器和制冷型探测器,实现高信噪比测量低温目标的辐射特性;3) 通过参数的匹配选择来满足更大动态范围目标辐射源的测试需求。

同时为了满足高精度的稳定测试,需要具备以下条件:1) 精细的主被动热控及高精度的 PID 控制,确保内定标辐射源的稳定性;2) 低噪声前置宽带放大

器、稳定的调制器控制及锁相放大器, 确保高稳定性的信号输出; 3) 高稳定性及辐射均匀性极佳的外定标器, 保障高精度辐射校准的准确度; 4) 辐射校准精准传递, 减少传递过程的不确定度, 提高测量精度。

中红外辐射计主要完成真空低温环境下对大面积辐射源的辐射温度/辐射均匀性及绝对量值的测量, 如图 2 所示, 主要技术指标如下:

- 1) 光谱范围: 2~5 μm ;
- 2) 测温范围: 200~500 K;
- 3) 视场角: $\phi 0.91^\circ$;
- 4) 测量黑体的有效辐射面积: 700 mm \times 1 800 mm;
- 5) 信号稳定性: $\leq 0.5\% @ 200 \text{ K}$;
- 6) 工作环境: 77 K, $1 \times 10^{-5} \text{ Pa}$;
- 7) 测量不确定度: $\leq 3\%$;
- 8) 体积: $\leq 300 \text{ mm} \times 200 \text{ mm} \times 240 \text{ mm}$;
- 9) 质量: $\leq 5 \text{ kg}$ 。

透射式光学系统在光学视场内收集大面积辐射源的目标辐射, 通过内定标器中的调制斩波将目标辐射调制为周期性的方波信号, 同时采用主被动热控措施、调制器涂覆涂层 (朝向光学镜头一侧涂覆高反射率金涂层, 朝向探测器一侧涂覆高发射率涂层) 和高精度 PID 温控精细控制调制器。一方面调制信号与参考信号的相关运算获取有用信息, 另一方面作为内置定标源校准探测器及信号处理电路 (前置宽带放大器和锁相放大器) 的辐射响应度。采用外定标器校准含光学系统在内的整个中红外辐射计系统的辐射响应度。红外探测器采用光学浸没光伏型 HgCdTe 结构的四级电制冷探测器, 以达到最佳

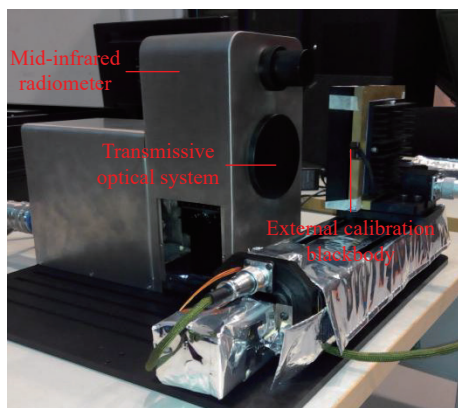


图 2 中红外辐射计图片

Fig.2 Photo of the mid-infrared radiometer

的性能和稳定性。采用 MCT-1000 前置放大器和 YD-PHLa 锁相放大器, 根据实际测试获取的电压信号值, 利用辐射响应公式反演测试目标辐射源的温度和绝对辐射量值, 移动中红外辐射计测量大面积辐射源不同区域, 统计分析获取的电压信号值得到大面积辐射源测试区域的辐射均匀性和温度场分布。

2.3 光学系统

为了保证系统具有良好的辐射能量收集能力, 最大化简化结构, 采用非球面锗镜作为成像透镜, 同时在透镜上镀 2~5 μm 的增透膜, 光学系统设计如图 3

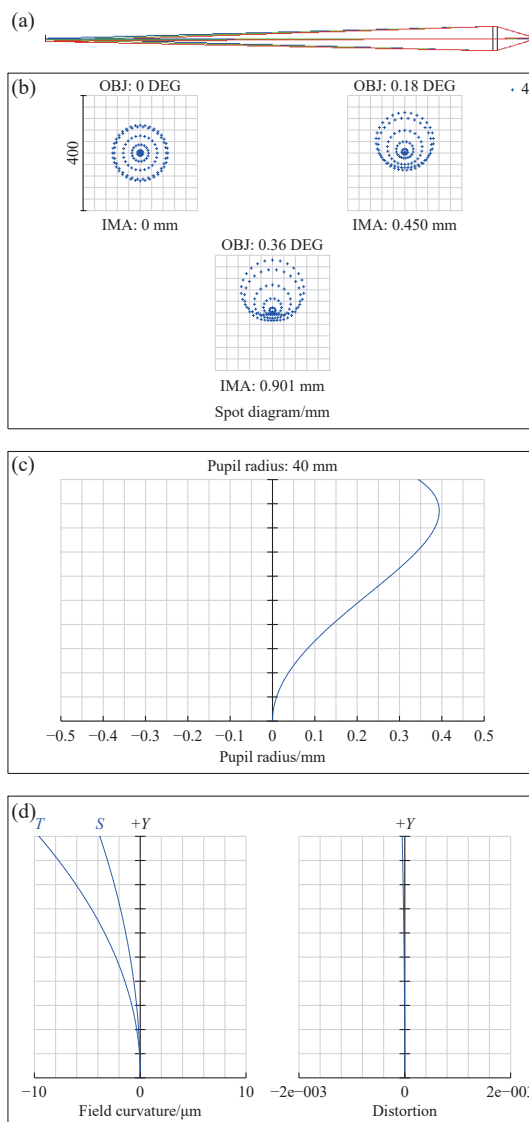


图 3 (a) 中红外辐射计光学设计结果; (b) 点列图; (c) 像差; (d) 场曲与畸变

Fig.3 (a) Optical design results of the mid-infrared radiometer; (b) Spot diagram; (c) Aberration; (d) Field curvature and distortion

所示。

光学镜头在常温下装调,而使用环境为真空低温,在常温下按照真空低温的使用环境标校最佳像面,保证到达调制器处的光斑大小最佳,便于后续高信噪比信号的解调。

2.4 光机结构

在 77 K 的真空深冷环境下,当探测 200 K 的微弱目标信号时,红外辐射计的背景辐射主要来自仪器本身的光学系统和支撑结构,其灵敏度受到系统自身辐射的严重影响,冷却光学系统减少这一热噪声可提高探测器的灵敏度。在 77 K 的低温状态下,工作的光学系统面临一系列问题,它们涉及材料特性、光学元件单元及系统整机性能变化、光学元件变形、低温污染等。在低温环境下,由于环境温度的变化,光学材料的光学、结构参数发生相应的变化,引起系统性能的变化,如果不考虑温度因素所带来的影响,将严重影响系统的运行质量。与可见光光学材料相比,红外光学材料具有很高的折射率温度变化系数,温度变化对系统性能的影响更严重,要保证光学系统能够在较宽的温度范围内稳定工作,必须消除温度场引起的光学系统的变化。

光学镜筒采用高稳定性、高比刚度^[8]与高强度的复合材料合金,与光学镜面热膨胀系数接近,避免镜头结构对镜片产生较大的温度应力,并减少热控的压力。通过镜筒合理的设计匹配,可以保证相机镜头长期工作的尺寸稳定性,获取良好的成像质量。光学镜头筒是安装光学镜片的支撑体,而光学镜面的安装情况、光学镜筒的材料加工与最终成像质量有很大的关系。综合考虑后采用 TZM 钼作为镜筒材料。

鉴于光管苛刻的使用环境,首先选用热膨胀系数相近的镜体材料和镜筒材料,如上所述,镜体选用光学锗加工成形,镜筒材质选用 TZM 钼与之匹配,这样更容易做到光学组件径向的消热设计,当组件在温度变化时由于透镜、镜座不同的径向膨胀或收缩而在光机元件内形成的应力减至最小。为了使得轴向设计也做到消热化^[9],设计时同样需要通过柔性设计将轴向透镜固定,如图 4 所示。

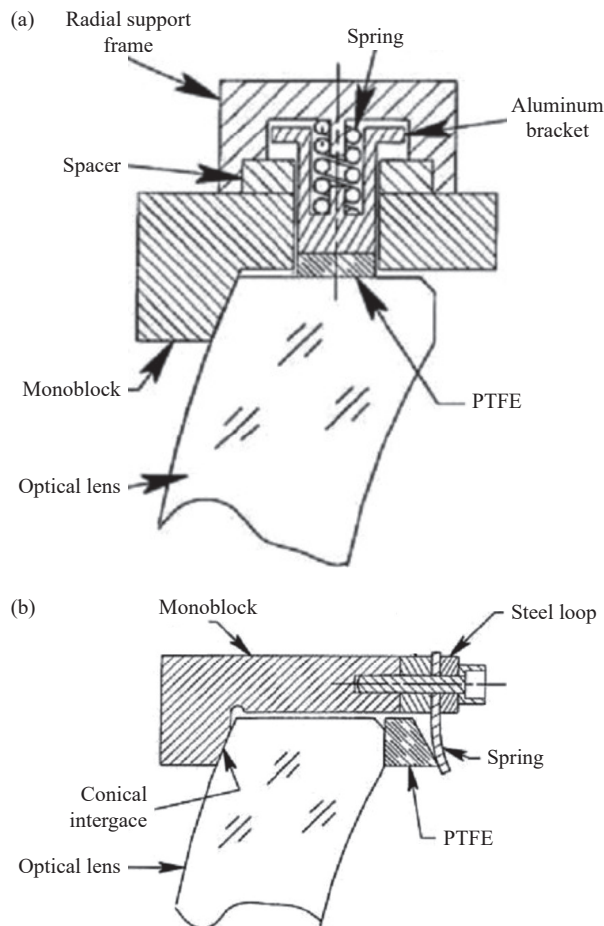


图 4 (a) 镜片径向安装固定结构; (b) 镜片轴向安装固定结构
Fig.4 (a) Radial mounting and fixing structure of lens; (b) Axial mounting and fixing structure of lens

2.5 热控系统

按照设计指标要求,红外辐射计工作在真空低温环境下(真空舱壁温度为 77 K)时能够正常使用,同时在普通实验室条件下(25 °C)也可以使用,这就要求系统中各部件对两个环境均具有适应性,为了保证运动部件中驱动部分的使用温度范围,需要对系统中外置黑体驱动机构、调制扇组件进行必要的热控设计来满足系统的工作要求。

热控设计采用主动热控和被动热控^[10]相结合的形式,根据测试环境的温度要求,模拟空间 77 K 的温度,真空条件为 1×10^{-5} Pa。主动热控采用分区加热片加热,被动热控采用包覆多层隔热材料,通过电缆及连接器连接至真空罐外的电源上,通过调整电源的电压、电流保证温度稳定,满足高温工况和低温工况^[11]的使用要求。

2.6 辐射校准系统

通过调制扇叶片的热辐射交替照明探测器获得定标信号的响应输出,如图 5 所示,除测试光路外,调制扇其余部位由外壳包覆。外壳的外层为金属外壳和隔热层,包覆内层为加热膜,加热膜对调制扇叶片进行热辐射加热。系统达到热平衡后,由于调制扇热的惯性作用和高速转动,调制扇叶片暴露在光路开口位置的时间很短,可以认为调制扇每个叶面的温度一致。

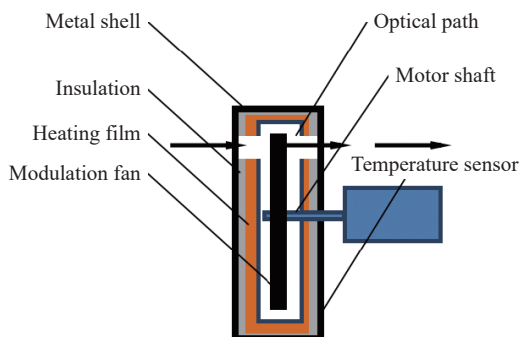


图 5 调制器热控结构

Fig.5 Schematic diagram of thermal control structure of modulator

2.7 电子学系统

电子学系统包括探测器之后的所有电路,主要包括前置放大器、锁相放大器、ADC 和数据通讯电路。

选用 VIGO 的 PVI-4 TE-5 光电导型探测器,配置

六挡可调增益 (0.06×, 1×, 5×, 10×, 20×, 30×) 宽带放大器,后端信号接入低噪声窄带锁相放大器,锁相放大器工作频率: $f=500\text{ Hz}$; 带宽: $\Delta f=50\text{ Hz}$ 。

标准黑体温度 287.2 K 下测试辐射计的增益线性度如图 6 所示,选择 0.06×, 1×, 5×, 10×四个线性区倍数为辐射计的有效增益。

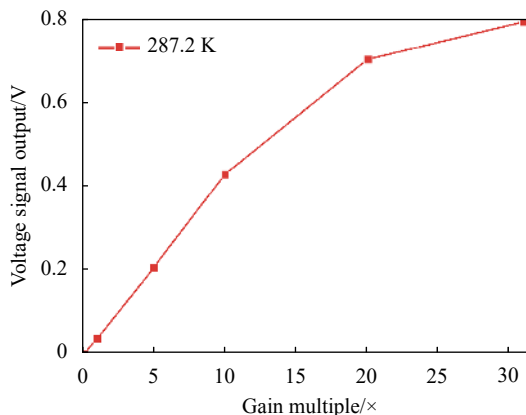


图 6 中红外辐射计增益测试

Fig.6 Gain measurement of the mid-infrared radiometer

锁相放大器与斩波调制器配合使用,将同步信号(参考信号)引入到锁相放大器的同步接口。目标辐射经调制包含在断续的辐射能中,便于信号的放大、处理和检测,可有效屏蔽杂散辐射,提取微弱信号,如图 7 所示。

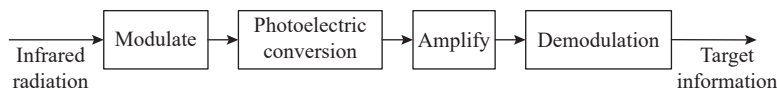


图 7 信号处理框图

Fig.7 Block diagram of signal processing

3 测试与评价

将集成后的中红外辐射计放置于 77 K、 $1\times 10^{-5}\text{ Pa}$ 的真空低温环境下,对信号稳定性、噪声等效温差 (NETD)^[12]、温度响应度进行详细测试,并列举各个环节误差,分析系统的测量精度。测试现场如图 8 所示。

3.1 信号稳定性

利用黑体辐射源测试辐射计的信号稳定性,选用 5 倍增益,1 h 内统计信号电压的平均值为 0.58899 V,标准偏差为 0.00146 V。213 K 黑体辐射源测试,辐射计 1 h 内的信号不稳定性^[13]为 0.24%,满足高精度微弱信号的测试和辐射量值的传递需求。

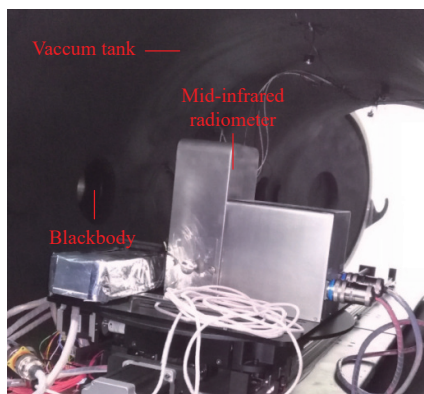


图 8 真空低温环境下中红外辐射计的标定现场

Fig.8 Calibration scene of the mid-infrared radiometer under vacuum and low temperature environment

辐射计性能基于足够的实验数据,从辐射计的应用场景和使用环境出发,在真空低温环境下进行了充分的性能测试验证和数据采集分析,对 485 K 目标辐射源测试了 16.3 h 的稳定性数据,统计分析 16.3 h 内不稳定性为 0.15%。

3.2 NETD

分析计算黑体温度 213 K 时的测试数据,辐射计的标准偏差为 0.00146 V,温度响应度为 0.042 V/K,得到中红外辐射计在 213 K 黑体目标的 NETD^[14]为 0.034 K。

3.3 温度响应度

在真空低温环境下,黑体辐射源温度设置为 -70~240 °C,待黑体稳定后在高温和低温两种工况下分别标定辐射计,得到两种工况下的温度响应度函数,相关系数优于 0.9999,可以作为有效的温度响应数据使用,校准后在同等环境条件下测试几个黑体温度确认校准数据的正确性。

低温工况 (-70~0 °C, 见图 9) 下,采用 5 倍增益,辐射计的信号输出与温度的函数关系为:

$$U_L = -13.704 \times T + 0.116 \times T^2 - 4.883 \times 10^{-4} \times T^3 + 1.025 \times 10^{-6} \times T^4 - 8.576 \times 10^{-10} \times T^5 + 645.5 \quad (12)$$

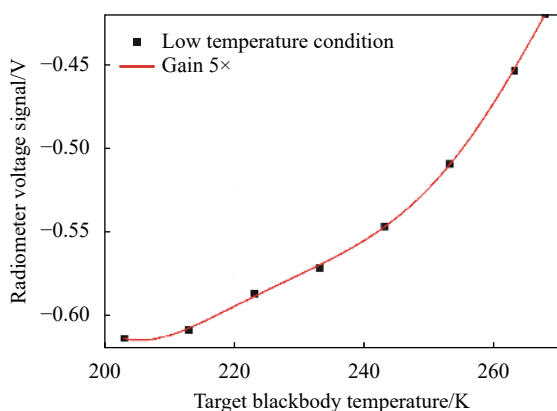


图 9 低温工况下中红外辐射计的温度响应度标定

Fig.9 Calibration of temperature response of the mid-infrared radiometer under low temperature condition

高温工况 (0~240 °C, 见图 10) 下,采用 0.06 倍增益,辐射计的信号输出与温度的函数关系为:

$$U_H = 0.037T - 1.641 \times 10^{-4}T^2 + 3.048 \times 10^{-7}T^3 - 1.928 \times 10^{-10}T^4 - 3.085 \quad (13)$$

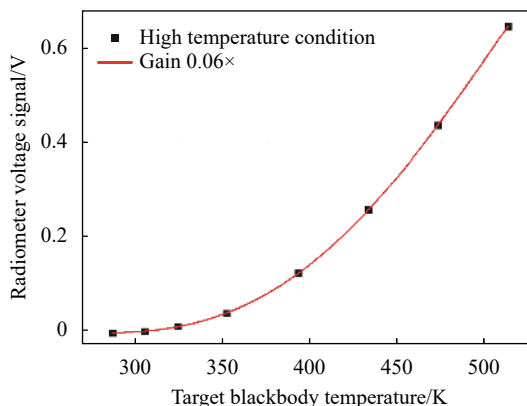


图 10 高温工况下中红外辐射计温度响应度标定

Fig.10 Calibration of temperature response of the mid-infrared radiometer under high temperature condition

3.4 不确定度分析

分析中红外辐射计辐射标准及其传递过程的不确定度^[15],采用标准辐射源法,通过中国计量科学研究院的可变温标准黑体定标外定标黑体,标准黑体溯源于金属凝固点黑体。

辐射标准及其传递过程的不确定度通过各个独立非相关的传递误差链确定。不确定度的贡献主要包括标准黑体传递的不确定度和仪器自身的不确定度。

其中标准黑体的不确定度根据校准证书,包括溯源 0.30%、发射率 0.10%、温度不稳定性 0.15%、非均匀性 0.20% 和非朗伯特性 0.10%。标准黑体的综合不确定度为 0.41%。

标准黑体传递的不确定度数据主要来源于校准证书。

1) 采用标准辐射源法,溯源不确定度按照正态分布, $K=2$, 计量基准为 0.6%, 溯源不确定度 $u_1=0.3%$ 。

2) 校准不确定度按照正态分布,标准黑体有效发射率溯源的不确定度为 $u=0.2%$, $K=2$, 有效发射率溯源引起的不确定度 $u_2=0.10%$;

3) 取各温度点偏差按照均匀分布,最大偏差为 0.26%, 标准黑体温度不稳定性引起的不确定度分量为: $u_3=0.15%$;

4) 非均匀性按照均匀分布,每间隔 10 mm 测试辐射面所有点的温度,统计标准黑体辐射面标准偏差与均值的比值,设置不同温度点取平均, $u_4=0.20%$ 。

5) 非朗伯特性按照均匀分布,对辐射面中心点和四周最外侧点,测试 5 个点各点绕黑体法线 $\pm 30^\circ$ 的温度值,统计各测试点温度角度内的标准偏差与均值的

比值, 设置 5 个温度点将比值取平均, $u_4=0.10\%$ 。

辐射计自身不确定度主要包括信噪比 1%、响应非线性 0.3%、信号不稳定性 0.24%; 环境温度影响定标不确定度 3 K@77 K, 误差优于 0.1%。

1) 测量中的基本误差是随机噪声, 如其他误差源减少到零, 剩余噪声为与探测器相关的约翰逊或散粒噪声。以噪声为主要误差项的系统中, 测量的不确定度与信噪比 (SNR) 成反比, 取 $SNR \geq 100$, 信噪比对辐射计自身不确定度分量为 1%;

2) 对红外辐射计输出信号和辐射亮度采用最小二乘进行线性拟合, 得到标准辐射亮度下红外辐射计理想的输出信号。高温和低温工况下线性拟合的相关系数分别为 0.997 和 0.998, 响应非线性带来的不确定度分量为 0.3%;

3) 信号不稳定性和 AD 量化误差归为一类, 统一为信号不稳定性。取信号偏差中的最大偏差按照均匀分布, 选取 -70~240 °C 之间 11 个温度点, 测试 1 h 内的信号不稳定性, 统计 11 个温度点最大偏差为 0.42%, 信号不稳定性对辐射计自身不确定度的分量为 0.24%;

4) 在红外系统的辐射定标过程中, 环境温度变化影响背景和系统光机结构温度, 造成背景辐射变化, 引入测量误差。

计算 77 K 环境温度下 ΔT 为 3 K 的光谱辐射亮度偏差, 比 200 K 目标辐射亮度的偏差小于 0.1%。

据此, 中红外辐射计辐射标准确立及辐射传递不确定度为以上各个误差项的综合效果。按照独立非相关误差合成 (如表 1 所示), 计算得到辐射计辐射标

表 1 辐射计辐射标准及其传递过程不确定度分析

Tab.1 Uncertainty analysis of radiation standards and transfer process of radiometer

Source of uncertainty	Value
Standard blackbody transmission	0.41%
Traceability uncertainty	0.30%
Uncertainty of blackbody emissivity	0.10%
Uncertainty of blackbody temperature	0.15%
Non-uniformity	0.20%
Non-lambertian	0.10%
Uncertainty of radiometer	1.08%
SNR	1%
Response nonlinearity	0.3%
Signal instability	0.24%
Environmental temperature effects	0.1%
Combined uncertainty	1.16%

准及其传递过程的综合不确定度为 1.16%。

与中国计量科学研究院在实验室环境下的测试校准数据进行比对, 校准温度点为 350 K, 比对后测量温度的最大偏差为 0.2 K, 对测量精度进行了验证, 如表 2 所示。

表 2 与中国计量科学研究院现场校准对比

Tab.2 Comparison of on-site calibration with National Institute of Metrology

Number	Setting value/K	Measured value/K	True value/K
1	240.0	239.6	239.5
2	300.0	299.5	299.7
3	400.0	399.1	399.2
4	500.0	498.5	498.7

4 结 论

针对真空低温条件下大面积中红外辐射源性能评测的需求, 提出了真空低温环境下中红外辐射计低温目标的高精度测量方法, 详细分析了测量低温目标的辐射模型, 测量了 200 K 低温目标的信噪比为 460 倍, 介绍了辐射计的系统组成和工作原理, 并详细设计了光机电及热控各系统。最后, 在真空低温环境下详细测试与评价辐射计。测试结果证明: 在 77 K、 1×10^{-5} Pa 真空低温环境下, 测试 213 K 黑体目标辐射源, 1 h 内的信号不稳定性为 0.24%; NETD 为 0.034 K; 测量精度优于 2%。表明, 该方法可以高精度、高信噪比地测试真空低温环境下的低温目标。

参考文献:

[1] Li Xiaoman, Hu Bin, He Jialiang, et al. Study of testing the detecting SNR of point target imaging infrared remote sensing systems [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(8): 20210929. (in Chinese)

[2] Lv Yuan, Cong Mingyu, Zhao Yini, et al. Research on real-time absolute radiometric calibration technology of infrared cameras [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2022, 51(7): 20220395. (in Chinese)

[3] Sheng Yicheng, Dun Xiong, Jin Weiqi, et al. Review of on-orbit radiometric calibration technology used in infrared remote sensors [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2019, 48(9): 0904001. (in Chinese)

- [4] Wang Shangbin. Research on absolute calibration technology of infrared radiometer [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2022. (in Chinese)
- [5] Qiu Chao, Zhai Siting, Wu Kexuan, et al. Research on low-temperature infrared radiation measurement technology under vacuum condition [J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(4): 730-736. (in Chinese)
- [6] Dan Qiusha, Xie Meilin, Liu Chaohui, et al. Design of cooled long-wavelength infrared imaging optical system [J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(1): 72-78. (in Chinese)
- [7] Qian Jing, Sun Shengli, Yu Shengyun, et al. Design of large size infrared radiant planar source [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2013, 42(1): 31-35. (in Chinese)
- [8] Zhao Yu, Su Chengzhi, Zhao Guijun, et al. Structural optimization for the design of an ultra-lightweight SiC mirror with a diameter of 500 mm [J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(6): 1352-1361. (in Chinese)
- [9] Feng Lijun, Li Xunniu, Chen Jie, et al. Design of long-wavelength infrared athermalization lens with large relative aperture for large-array detectors [J]. *Infrared Technology*, 2022, 44(10): 1066-1072. (in Chinese)
- [10] Jiang Feng, Kong Lin, Bai Tian, et al. Thermal design and verification of the optical system of the aircraft camera [J]. *Spacecraft Recovery & Remote Sensing*, 2021, 42(5): 21-30. (in Chinese)
- [11] Zhang Xingli, Tao Guozhu, Ye Dong, et al. Thermal control design for the small aircraft based on grapheme layer enhanced heating [J]. *Spacecraft Environment Engineering*, 2022, 39(5): 509-514. (in Chinese)
- [12] Xie Xinlong, Zhu Xiaoxiao, Zhu Jiacheng, et al. Analysis and suppression of stray radiation in uncooled thermal infrared imaging spectrometer [J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(15): 1512006. (in Chinese)
- [13] Deng Rujie, Zhang Yibin, Liu Heshan, et al. Ground electronics verification of inter-satellites laser ranging in the Taiji program [J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(4): 765-776. (in Chinese)
- [14] Ma Yan, Zhangshuai, Liu Yuan, et al. Lunar long-wave infrared radiation characteristics based on space-based quantitative measured data [J]. *Chinese Optics*, 2022, 15(3): 525-533. (in Chinese)
- [15] Liu Zengcan, Zhang Qunxing, Luo Zhonghua, et al. Research on uncertainty analysis of ground equipment infrared radiation measurement [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2021, 18(7): 1-6. (in Chinese)

High-sensitivity mid-infrared radiometer under vacuum and low temperature

Sun Jingxu, Fei Qiang, Xie Hongbo, Wang Shuo, Xie Xinwang

(Ji Hua Laboratory, Foshan 528200, China)

Abstract:

Objective With the development of infrared technology, infrared band detectors are widely used in military, industrial, agricultural, aerospace and other fields. The optical aperture of infrared payloads is increasing to meet the needs of higher resolution applications, and ultra large aperture infrared radiation sources can simulate the targets observed by infrared payloads in orbit. The infrared radiation energy of these targets is very weak. Under the normal temperature environment, the weak infrared target radiation will be submerged by stray radiation and the thermal radiation of the optical system itself, which cannot provide the true radiation for infrared payload detection targets. Therefore, an infrared radiometer is used to test ultra large aperture infrared radiation sources under vacuum and low-temperature environment, and to evaluate radiation/temperature uniformity. In order to accurately evaluate the uniformity of large-area black-body radiation source under vacuum and low temperature, a high-sensitivity mid-infrared radiometer is designed.

Methods The physical model of radiation calibration is given, and the signal-to-noise ratio of the target temperature of 200 K and 213 K is analyzed in detail. The signal-to-noise ratio of 200 K and 213 K target under

vacuum and low temperature is 460 and 1 492 times respectively. The overall scheme of measuring 200 K target with high signal-to-noise ratio is designed, and the mid-infrared radiometer with high sensitivity under vacuum and low-temperature environment is developed. The transmission optical system and temperature coefficient matching stable high-rigid optical mechanical structure support is adopted to meet the vacuum and low-temperature environmental conditions. Calibration of temperature/radiation responsivity of mid-infrared radiometer with external blackbody, the modulator is innovatively used as the intercalibration radiation source. Using four-stage TE refrigeration mid-infrared detection unit, together with high-performance detection unit and 80 dB dynamic range synchronous integral phase-locked amplifier, the high-quality square wave signal with large duty cycle for radiation calculation is obtained.

Results and Discussions A high-precision measurement method for low-temperature targets of mid infrared radiometers in vacuum low-temperature environments is proposed to meet the performance evaluation requirements of large-scale mid infrared radiation sources under vacuum low-temperature conditions, a detailed analysis is conducted on the radiation model for measuring low-temperature targets, the system composition and working principle of the radiometer are introduced, and the optoelectromechanical and thermal control systems are designed in detail. Testing 213 K target blackbody source under the environment of 77 K and 10^{-5} Pa, the experimental results indicate that the signal instability within one hour is 0.24%. The NETD value is 0.034 K. The measurement accuracy is better than 2%. Mid-infrared radiometer meets the requirements of high-precision measurement of weak target in vacuum and low-temperature environment.

Conclusions Aiming at the requirement of performance evaluation of large-area mid-infrared radiation source under vacuum and low-temperature conditions, a high-precision measurement method of low-temperature target under vacuum and low-temperature conditions is proposed. The radiation model of measuring low-temperature target is analyzed in detail. The signal-to-noise ratio of measuring 200 K low-temperature target is 430 times. The system composition and working principle of mid-infrared radiometer are introduced, and the opto-electro-mechanical and thermal control systems are designed in detail. Finally, the mid-infrared radiometer is tested and evaluated in detail under vacuum and low-temperature environment. The test results show that the mid-infrared radiometer can be used for high-precision and high signal-to-noise ratio test of cryogenic targets in vacuum and cryogenic environment

Key words: mid-infrared band; high-precision; vacuum and low temperature; absolute radiation value; high rigid

Funding projects: Research and Development Plan in Key Areas of Guangdong Province (2018B030328001)