

文章编号:1001-5078(2024)12-1913-07

· 光电技术与系统 ·

热电桥型太阳绝对辐射计设计

王举光^{1,2}, 杨东军¹, 隋龙¹, 叶新¹, 贾瑞栋¹

(1. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 太阳绝对辐射计(SIAR)采用热电堆型探测器将入射太阳光功率转换为电功率,实现太阳总辐照度测量,但热电堆探测器存在以下局限性:首先,受热电偶数量的限制,难以进一步提高灵敏度;其次,受制作工艺复杂的限制,主备腔一致性难以保证。为了解决这些问题,本文基于惠斯通桥高互换性、高分辨率的特性,采用全新的探测器锥腔结构和全新的热连接方式,研制了一台具有高灵敏、高精度的热电桥型绝对辐射计。测试结果表明:探测器时间常数9.69 s,灵敏度0.078 W/m²,钨灯光源测量重复性优于0.07%,满足0.1%精度太阳总辐照度观测需求。

关键词: 绝对辐射计; 太阳总辐照度; 惠斯通桥; 热电桥型探测器; 测量电路

中图分类号: TP274; TH741 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2024.12.016

Design of thermoelectric bridge solar absolute radiometer

WANG Ju-guang^{1,2}, YANG Dong-jun¹, SUI Long¹, YE Xin¹, JIA Rui-dong¹

(1. Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun 130033, China;
2. University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The solar irradiance absolute radiometer (SIAR) adopts the thermopile-type detector to convert incident solar light power into electrical power, achieving the measurement of total solar irradiance. However, the thermopile detector has the following limitations. Firstly, it is difficult to further improve the sensitivity due to the limitation of the number of thermocouples. Secondly, the consistency of the main and backup chambers is difficult to be ensured due to the limitation of the complex fabrication process. To solve these problems, this paper develops a thermoelectric bridge absolute radiometer with high-sensitivity and high-precision based on the high interchangeability and high-resolution characteristics of the Wheatstone bridge, and adopts a new detector cone cavity structure and a new thermal connection method. The test results show that the time constant of the detector is 9.69 s, the sensitivity is 0.078 W/m², and the measurement repeatability of tungsten light source is better than 0.07%, which can meet the observation requirements of total solar irradiance with a precision of 0.1%.

Keywords: absolute radiometer; total solar irradiance; Wheatstone bridge; thermoelectric bridge detector; measurement circuits

基金项目: 国家重点研发计划“太阳绝对光谱辐照度测量基准载荷工程技术”项目(No. 2022YFB3903100; No. 2022YFB3903105)资助。

作者简介: 王举光(1996-),男,硕士,主要研究方向为弱信号测量。E-mail:1525208740@qq.com

通讯作者: 杨东军(1979-),男,博士,研究员,主要研究方向为太阳辐射测量。E-mail:djyang0827@163.com

收稿日期: 2024-02-05; **修订日期:** 2024-03-23

1 引言

作为地球气候模型中的重要输入参数,太阳辐射是地球最主要的外部能源输入,其蕴含的能量是地球其他外部能源输入总和的3000倍以上^[1]。太阳总辐照度(TSI)的微小变化可以对地球环境产生明显影响,因此精密监测 TSI 变化具有重要意义。因大气层的吸收作用^[2-3],TSI 只能通过星载仪器实现长期精确监测。目前,国内外不同卫星平台、不同类型的仪器已连续进行了46年 TSI 天基观测。

长春光机所 SIAR 辐射计是我国唯一天基 TSI 观测仪器,已成功搭载在 FY-3A、B、C、E、F 多颗卫星上^[4-6],测量精度优于0.1%。SIAR 辐射计采用热电堆结构如图1所示,能够将太阳辐射造成的锥腔温升转化为电压。然而,由于其制作工艺复杂,成品率和通道一致性难以保证,双腔温度互补补偿效果被削弱。此外,受热电偶数量限制,灵敏度也难以进一步提高。相比之下,国外的同类仪器如美国 TSIS^[7]和瑞士 DARA 辐射计采用高精度温度传感器直接测量锥腔温升如图2所示。这种类型探测器结构和工艺相对简单,一致性更高,而且温度传感器代替热电偶,未来可基于正交调制解调方法,实现时域测量到频域测量的转变,有效降低带外噪声,提高测量精度。为实现后续卫星 SIAR 辐射计技术更新,在国家重大仪器专项子课题资助下,本文研究的热电桥型绝对辐射计实现了0.1%精度太阳总辐照度测量。

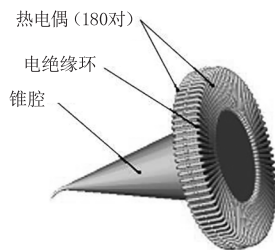


图1 热电堆结构

Fig. 1 The thermopile structure

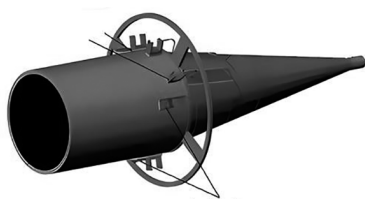


图2 TIM 探测器

Fig. 2 TIM detector

2 辐射计测量原理

SIAR 绝对辐射计的基本结构如图3所示,主要由快门、光学系统、工作腔、参考腔、热电堆、加热丝和电子学系统组成。快门实现光的入射和屏蔽,光学系统实现视场角的约束并限制杂散光,热电堆实现热电转换,工作腔和参考腔组成背靠背结构消除环境温度影响,加热丝实现光功率的替代,电子学系统实现各部组件控制、TSI 测量和数据通讯。

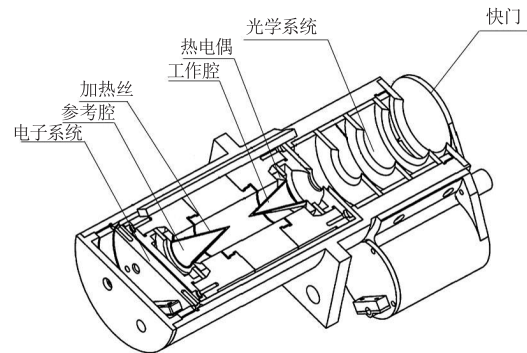


图3 SIAR 辐射计基本结构

Fig. 3 The basic structure of the SIAR radiometer

本文结合国外先进经验,设计工艺更简单的电桥型绝对辐射计,其测量原理如图4所示。该过程分为两个阶段:第一阶段,开启主腔快门,电桥平衡被打破,入射光功率与加热丝功率使电桥重新获得平衡,此时加热丝功率为 P_1 ;第二阶段,关闭主腔快门,增加加热丝加热功率使电桥重新平衡到与第一阶段相同水平,此时加热丝功率为 P_2 。加热功率差值($P_2 - P_1$)为入射光功率,入射光功率与主光阑面积 A 的比值即太阳总辐照度 $(P_2 - P_1)/A$ 。

热电桥型辐射计和 SIAR 辐射计虽然都基于电替代和双腔互补原理,但探测器结构和测量电路却不相同。对于热电桥型辐射计,其设计目标包括:探测器时间常数 ≤ 12 s,响应度 ≥ 20 K/W,灵敏度 < 0.1 W/m²,分辨率 $\leq 5 \times 10^{-4}$,测光重复性 $\leq 0.1\%$ 。

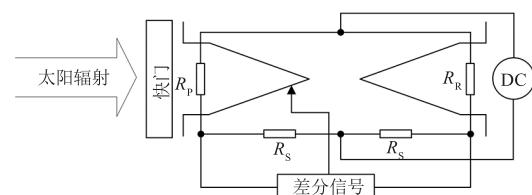


图4 热电桥型辐射计测量原理

Fig. 4 The measurement principle of the thermoelectric bridge type radiometer

3 探测器设计

热电桥型探测器机构如图5所示,由锥腔、不锈钢热连接、热沉安装环、加热丝、温度传感器组成。锥腔内壁涂有黑漆可将光能转换为温升,温度传感器再将其转化为电信号;加热丝用于实现光功率的等效替代,热沉安装环将探测器固定在温度相对稳定的热沉上,不锈钢热连接提供适当热阻,保证光照、加热时锥腔有明显温升,提高温度传感器分辨率。

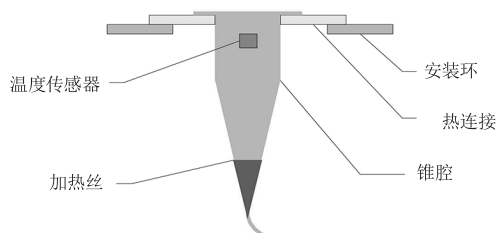


图5 热电桥型辐射计测量原理

Fig. 5 The measurement principle of the thermoelectric bridge type radiometer

3.1 锥腔设计

3.1.1 锥腔直径设计

入射光到达锥腔前先经过主光阑,因此探测器直径受主光阑面积限制。目前国内外常用的主光阑尺寸为 $\phi 5\text{ mm}$ 和 $\phi 8\text{ mm}$ 两种,本文采用的 $\phi 8\text{ mm}$ 主光阑具有易于加工,面积测量精度高,腔内入射光功率高,腔温升高,电路分辨率高等优点。

锥腔直径同时还受光学系统限制。为降低视场内杂散光,采用主光阑前置光学设计如图6。根据给定的光学系统长度 97 mm ,无遮拦视场 $\pm 1^\circ$,通过几何关系可以推导出锥腔直径应大于 11.39 mm 。为了确保锥腔能够接收经过主光阑的所有入射光,锥腔直径还需保留 $1\sim 2\text{ mm}$ 的设计余量。因此,锥腔直径最终被设计为 13 mm 。

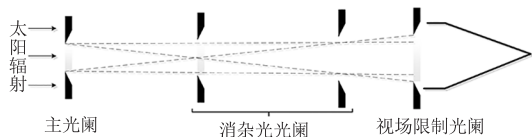


图6 主光阑前置光学系统示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the main diaphragm front optical system

3.1.2 锥角设计

在探测器的锥角设计中,加热丝阻值和光在锥腔内的反射次数是两个关键的制约因素。为了实现精密可测电功率替代光功率,需要确保埋入锥腔的加热丝产生的电功率与入射光功率相等。此外,加

热丝的缠绕面积必须与光源在锥底面的照射面积一致,保证光电转换两阶段的等效性。本文选用直径为 0.0508 mm ,电阻率为 $0.4\ \Omega/\text{cm}$ 的康铜线缠绕加热丝。比较 30° 与 40° 锥腔(如图7),在相同的投影面积下(如 $\phi 8\text{ mm}$), 30° 锥腔所需的加热丝更长,导致加热丝阻值更大,从而提高了加热功率分辨率。在图8中,入射光在 30° 锥腔内表面经过6次反射后平行射出,在保证锥腔光吸收率一致的同时,有效提高锥腔光吸收率。



图7 30° 与 40° 锥腔示意图

Fig. 7 Schematic diagram of 30° and 40° cone cavity

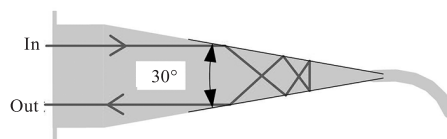


图8 光在 30° 锥腔内部反射示意图

Fig. 8 Schematic diagram of internal reflection of light in a 30° cavity

3.1.3 柱高设计

探测器吸收率由黑漆自身吸收率和探测器结构决定,如公式(1)所示。辐射计在测量过程中受紫外照射,黑漆自身吸收率会衰减。为了降低黑漆自身衰减对探测器吸收率的影响,需要选取合适的探测器尺寸。当黑漆自身吸收率为 0.98 时,探测器吸收率随高度升高而增加,如表1所示。结合空间尺寸约束,选取 5 mm 柱高。

$$\alpha_q = 1 - \frac{(1 - \alpha_h) \cdot \left(\frac{D}{2}\right)^2}{\left(\frac{D}{2}\right)^2 + H^2} \cos r \quad (1)$$

式中, α_h 为黑漆吸收率; D 为锥腔底面直径; H 为锥腔高度; r 为锥顶角。

表1 不同柱高下的锥腔光吸收率

Tab. 1 The light absorption rate of cavities with different column heights

Column height H_c/mm	Formula $\Phi_F/\%$
1	99.89
2	99.90
3	99.91
4	99.91
5	99.92

3.2 热连接环设计

热连接环是锥腔与热沉的连接媒介。锥腔发生热量传递时,因热连接环热阻产生温升,并由温度传感器测量,温升越高,温度传感器分辨率越高,越有利于电子学测量,但过高的温升会使时间常数过长,不利于腔高精度稳定。本文热连接环的设计目标值为热阻 $\geq 20 \text{ K/W}$,温升 $\leq 2 \text{ K}$,时间常数 $\leq 12 \text{ s}$ 。

热连接环结构如图 9 所示,热阻环材料为 304 不锈钢,由式(2)~(4)可求得热阻 $R = 25.68 \text{ K/W}$,时间常数 $\tau = 10.52 \text{ s}$,温升 $\Delta T = 1.80 \text{ K}$ 。



图 9 热连接环结构

Fig. 9 The structure of thermal connection ring

$$R = \frac{\delta}{\lambda A} \quad (2)$$

$$\tau = cmR \quad (3)$$

$$\Delta T = pR \quad (4)$$

式中, δ 为材料厚度; λ 为导热系数; A 为接触面积; c 为比热容; m 为质量; p 为加热功率。

借助 comsol 仿真软件,在环境温度为 298.15 K,加热功率为 75 mW 的条件下分别对热连接环进行稳态与瞬态仿真。其中稳态仿真结果如图 10 所示,瞬态仿真结果经 origin 拟合得到如图 11 所示的温升曲线。最终得到该探测器温升为 1.87 K,时间常数为 11.87 s,计算与仿真结果近似,满足探测器设计要求。

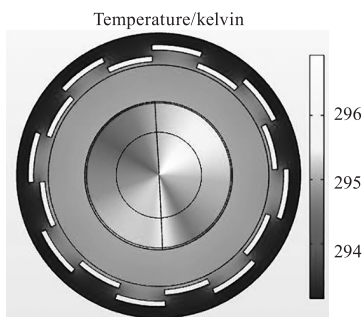


图 10 热连接环仿真

Fig. 10 The thermal connection ring simulation

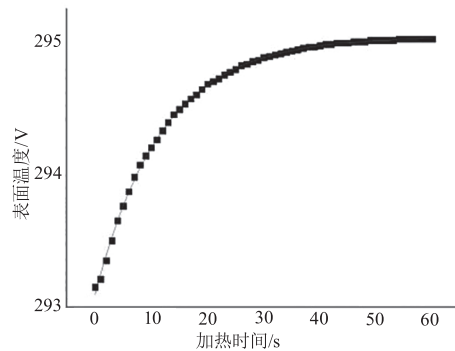


图 11 拟合温升曲线

Fig. 11 Fitting temperature rise curve

4 电路设计

4.1 电路框图

热电桥型绝对辐射计电路框图如图 12 所示,电路工作过程分为两个阶段:第一阶段,主控驱动电机打开快门,DA 转换器提供低加热功率与电桥激励,主控驱动模拟开关选择 AD 转换器采样通道,AD 采集电桥信号与加热丝加热功率,该过程直至电桥平衡;第二阶段,主控驱动电机关闭快门,增加 DA 输出使电桥重新平衡到与第一阶段相同水平,并获得此时的加热功率。最后主控计算两个阶段加热功率差值并除以主光阑面积得到太阳总辐照度。

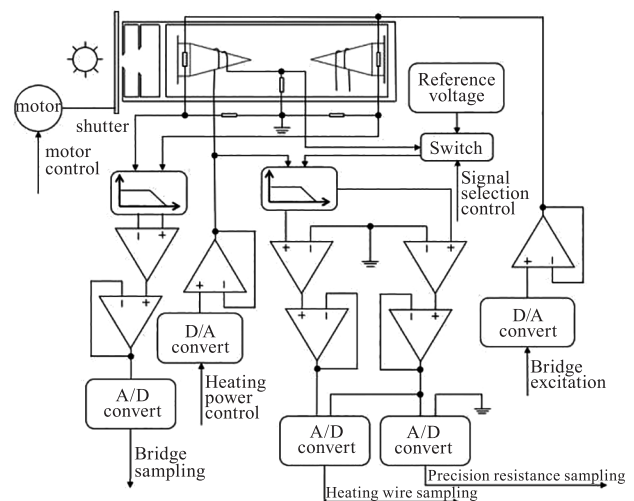


图 12 热电桥型绝对辐射计电路框图

Fig. 12 Circuit diagram of thermoelectric bridge type absolute radiometer

4.2 桥的设计

热电桥测量原理如图 4,电桥信号 U_E 计算方法如下:

$$U_E = U_D \left(\frac{1}{R_s + R_p} - \frac{1}{R_s + R_R} \right) \quad (5)$$

式中, R_p 为主控温度传感器阻值; R_R 为备腔温度传

传感器阻值; R_s 为电桥参考电阻阻值; U_D 为激励信号电压值。

本文选用的高精度温度传感器 GA10K3MCD1 时间常数是 0.2 s, 能够快速响应探测器温度变化, 且具有较大的 B 值 3976 K。电桥参考电阻阻值 13 k Ω , 保证在 0 $^{\circ}\text{C}$ ~ +30 $^{\circ}\text{C}$ 工作温度范围内, 电路有较高的分辨率。

4.3 AD 转换器的选型

本电路中, AD 转换器主要实现的功能是采集电桥输出信号和加热功率, 其中电桥输出信号对 AD 转换器性能需求最高。电桥信号后接放大电路, 增大信号分辨率。A/D 模数转换器最大量程的设计值为 $U_{AD} = \pm 5 \text{ V}$ 。根据式(5), AD 转换器需分辨 $U_{pp} = 2 \text{ mV}$ 的差分信号, 由式(6)得到 AD 有效分辨率需满足 15 bit。

$$N = \frac{20 \log\left(\frac{U_{\text{device}}}{U_{pp}}\right) - 1.76}{6.02} + 2.7 \quad (6)$$

式中, U_{device} 为测量仪器满量程范围或信号源输出平均值; U_{pp} 为信号峰峰值。

根据设计要求与计算结果, 选择 AD 转换器 AD7710, 50 Hz 转换频率下有效分辨率为 20 bit, 温度漂移 20 ppm/ $^{\circ}\text{C}$, 工作温度 -40 $^{\circ}\text{C}$ ~ +85 $^{\circ}\text{C}$ 。

4.4 DA 转换器与基准电压源的选型

DA 转换器是辐射计电桥激励电路与加热电路的执行器件。对加热丝做功, 其中电桥激励对 DA 转换器要求最高。由于 AD 转换器需分辨 2 mV 的电桥信号, 所以 DA 提供的激励信号峰峰值设计值为 0.5 mV; DA 输出设计值为 $\pm 10 \text{ V}$ 。由式(6)得到 DA 有效分辨率需满足 17 bit。根据设计要求与计算结果, 选择 DA 转换器 AD5791, 有效分辨率 20 bit, 温度漂移 0.05 ppm/ $^{\circ}\text{C}$, 工作温度 -40 $^{\circ}\text{C}$ ~ +125 $^{\circ}\text{C}$ 。

高精度, 高稳定性基准电压源是维持 AD、DA 转换器高分辨率的必要条件, 若想发挥 AD、DA 转换器性能, 基准电压源的有效分辨率需满足 18 bit。本文选择的基准电压源是 AD586, 有效分辨率 20 bit, 在 0 $^{\circ}\text{C}$ ~ +70 $^{\circ}\text{C}$ 下温度漂移为 2 ppm/ $^{\circ}\text{C}$ 。

5 实验测量

5.1 采样精度测试

为验证 AD 采样电路的分辨率, 分别采样电压基准 AD586 和 DA 输出电压采样频率为 10 Hz, 采

样结果如图 13、图 14 所示。两组测试中, AD 采样电路都得到 19 bit 有效分辨率的结果, 因此可以说 AD 采样电路满足辐射计的设计要求。

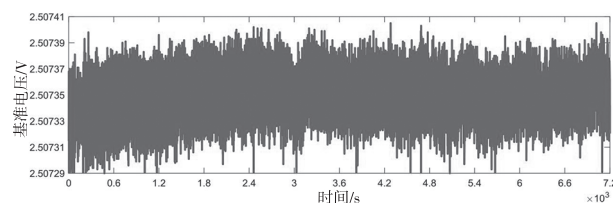


图 13 基准电压采样

Fig. 13 Reference voltage sampling

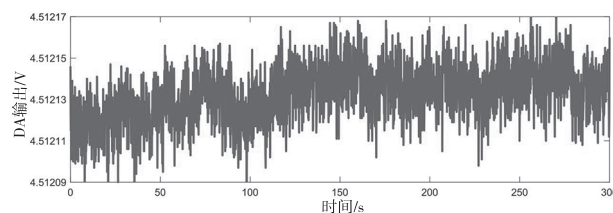


图 14 DA 电路采样

Fig. 14 DA circuit sampling

5.2 自测试

为检测辐射计性能是否满足设计要求, 需要模拟电桥信号在 75 mW、5 mW 加热功率状态下的变化。其中 5 mW 为辐射计在第一阶段所加功率, 在此功率下, 电桥输出最小值; 75 mW 为最大可测量功率与低功率的合计值, 在此功率下, 电桥输出最大值。高、低功率的切换可获得辐射计的时间常数。

测试开始前, 需要对探测器高温预热, 保证辐射计工作平稳^[8]。测试期间快门保持关闭状态, 避免辐射计受背景光影响。测试的采样频率 1 Hz, 采样结果如图 15 所示。

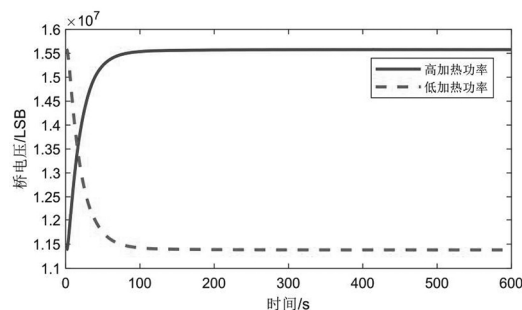


图 15 自测试结果

Fig. 15 Self-test results

根据测试结果, 可获得以下仪器参数, 各项参数结果满足设计要求。

5.2.1 时间常数 τ , 热阻 R , 温升 ΔT

时间常数指在满加热功率变化下, 探测器再次建立稳态的时间。

$$\tau = \sum_{i=1}^{300} \left(\frac{1}{300} \cdot \ln \left[\frac{U_{\text{code}}(t_{300}) - U_{\text{code}}(t_i)}{U_{\text{code}}(t_{300}) - U_{\text{code}}(t_{i-1})} \right] \right) \quad (7)$$

式中, $U_{\text{code}}(t_i)$ 是第 t_i 秒电桥采样值。

经计算,高功率时间常数为 9.56 s,低功率时间常数为 9.81 s,以平均值 9.69 s 作为仪器时间常数。依据式(3)~(4)可算出热阻 $R = 23.65 \text{ K/W}$,温升为 $\Delta T = 1.66 \text{ K}$,满足热阻大于 20 K/W,温升小于 2 K的设计目标。

5.2.2 响应度 R_s

自测试中,加热功率与电桥信号成正比,响应度 R_s 是加热功率与电桥信号(码值)的比例系数。

$$R_s = \frac{P_H - P_L}{\Delta V_{\text{code}}} = 1.67 \times 10^{-8} \text{ W/LSB} \quad (8)$$

式中, P_H 、 P_L 是实际高、低加热功率。

受器件、电路等因素影响,实际加热功率与设定值存在偏差,因此式(9)中的加热功率由 AD7710 采样计算获得。

5.2.3 噪声信号 ΔN

辐射计在工作过程中会长期处于高热功率状态,因此在计算噪声信号时应以高加热功率状态下为准。

$$\Delta N = \left(\sum_{i=291}^{300} (U_{\text{code}}(t_i) - \overline{U_{\text{code}}})^2 / 9 \right)^{\frac{1}{2}} = 236 \text{ LSB} \quad (9)$$

式中, $\overline{U_{\text{code}}}$ 为电桥采样均值。

5.2.4 测量灵敏度 S

灵敏度 S 是最小可分辨辐照度,也是噪声引发的辐照度误差。

$$S = \frac{\Delta N \cdot R_s}{A} = 0.078 \text{ W/m}^2 \quad (10)$$

式中, A 为主光阑面积。

5.2.5 电桥信号重复性 Re

$$Re = \frac{U_\sigma}{U_a} \quad (11)$$

式中, U_σ 为电桥平衡后采样标准差; U_a 为电桥平衡后采样均值。

经计算,高加热功率状态下,电桥信号重复性为 1.64×10^{-5} ;低加热功率状态下,电桥信号重复性为 1.21×10^{-5} 。

5.3 分辨率测试

为检验辐射计的分辨率能力,需要测试辐射计输出对变化 0.1% 加热功率的响应,测试结果如

图 16。在恒定的加热功率下,辐射计的输出噪声峰峰值为 758 LSB。在变化 0.1% 加热功率的条件下,辐射计输出信号出现 3729 LSB 的明显阶跃。输出信号跳变幅度约为噪声峰峰值的 4.9 倍,由式(12)可得到辐射计的实际分辨率 RES 为 2.05×10^{-4} 。

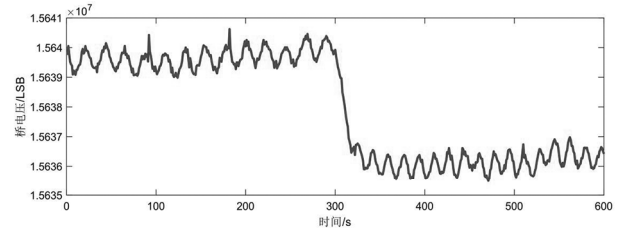


图 16 0.1% 分辨率测试

Fig. 16 0.1% resolution test

式中, U_{rapid} 为 0.1% 加热功率变化下输出变化码值; U_N 为恒定加热功率下噪声峰峰值。

5.4 辐射计重复性测试

辐射计重复性指辐射计观测一稳定光源下得到结果的重复性。本测试的光源为卤灯,测试前需要将卤灯辐照度控制在 1000 W/m^2 以上。测试时,首先通过自测试确定探测器响应度,随后进行采光和电定标两个阶段测试,两阶段电桥平衡差异通过响应度修正。测试结果如图 17,辐射计输出重复性为 6.23×10^{-4} ,满足辐射计设计要求。

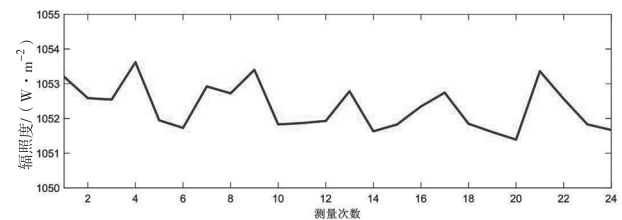


图 17 辐射计输出重复性测试

Fig. 17 Radiometer output repeatability test

6 结论

本文设计的热电桥式太阳绝对辐射计在保留原有辐射计高精度,高稳定性的基础上,实现探测器制作工艺的简化并提高了探测器一致性。通过测试得到仪器的时间常数 9.69 s,响应度 $1.67 \times 10^{-8} \text{ W/LSB}$ 、噪声 236 LSB、灵敏度 0.078 W/m^2 ,分辨率 2.05×10^{-4} ,电桥的重复性优于 1.64×10^{-5} ,辐射计测光重复性达到了 6.23×10^{-4} ,各项指标满足太阳总辐照度测量要求,未来可通过正交调制解调技术抑制带外噪声,进一步提升测量精度。

参考文献:

- [1] Kren A C, Pilewskie P, Coddington O. Where does earth's atmosphere get its energy? [J]. Space Weather Space Clim, 2017, 7: A10.
- [2] Jia Yaofeng, Wang Yupeng, Shen Honghai. Study on calibration method of direct channel of solar radiometer [J]. Laser & Infrared, 2023, 53(5): 764 - 771. (in Chinese)
贾曜峰, 王玉鹏, 沈宏海. 太阳辐射计直射通道定标方法研究 [J]. 激光与红外, 2023, 53(5): 764 - 771.
- [3] Li Na, Lin Guanyu, Duan Minzheng, et al. Research on radiation measurement technology based on multi-channel and high Lambertian property [J]. Laser & Infrared, 2019, 49(5): 577 - 583. (in Chinese)
李娜, 林冠宇, 段民征, 等. 基于多通道高朗伯特特性的辐射测量技术研究 [J]. 激光与红外, 2019, 49(5): 577 - 583.
- [4] Fang W, Wang H R, Li H D, et al. Total solar irradiance monitor for chinese FY-3A and FY-3B satellites-instrument design [J]. Solar Phys, 2014, 289: 4711 - 4726.
- [5] Yang Dongjun, Fang Wei, Ye Xin, et al. High precision sun-tracking of spaceborne solar irradiance monitor [J]. Optics and Precision Engineering, 2014, 22(9): 2483 - 2490. (in Chinese)
杨东军, 方伟, 叶新, 等. 星载太阳辐射监测仪的高精度太阳跟踪 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(9): 2483 - 2490.
- [6] Song B Q, Ye X, Finsterle W, et al. The fengyun-3E/Joint total solar irradiance absolute radiometer: instrument design, characterization, and calibration [J]. Solar Phys, 2021, 296: 52.
- [7] Kopp G, Lawrence G. The Total Irradiance Monitor (TIM): instrument design [J]. Solar Physics, 2005, 230: 91 - 109.
- [8] Yang Dongjun, Fang Wei, Ye Xin, et al. Parameters measurement of the absolute radiometer [J]. Computer Measurement & Control, 2009, 17(10): 1892 - 1894. (in Chinese)
杨东军, 方伟, 叶新, 等. 绝对辐射计参数测量的实现 [J]. 计算机测量与控制, 2009, 17(10): 1892 - 1894.