

文章编号 1004-924X(2015)07-1903-08

空间低温辐射计中的精密电压测量系统

宋宝奇, 叶 新, 杨东军, 姜 明, 方 伟*

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)

摘要: 为了基于测温电阻实现空间低温辐射计的腔温测量, 研究了系统的电子学测量精度和测量稳定度。结合实际电子学需求, 进行方案设计和器件选型, 提出了一种新型的基于超低噪基准源 LTZ1000ACH, 四线制柱状锗电阻 GR1400-AA 和 24 位模数转换器 LTC2400 的对偶相消式精密电压测量系统。对于整个链路信噪比进行了逐级理论计算和分析, 并通过电路仿真软件 TINA-TI 对系统幅频特性和温度响应特性进行了仿真分析, 最后在 77K 液氮环境下对该系统进行了测温精度和长期稳定性测试。实验结果表明: 锗电阻实际采样电压值在 100 μV 内波动, 长期测量稳定度达到 1×10^{-5} ; 在 77 K 液氮环境下, 系统测温精度达到 4 mK, 长期稳定性达到 1×10^{-5} 。得到的结果基本满足空间低温辐射计电子学部分的设计指标要求。

关键词: 低温辐射计; 锗电阻; 电压测量; 超低噪基准源; 24 位模数转换器

中图分类号: TP732; TM933.2 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20152307.1903

Precise measurement of voltages in space cryogenic radiation temperature system

SONG Bao-qi, YE Xin, YANG Dong-jun, JIANG Ming, FANG Wei*

(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: fangw@ciomp.ac.cn

Abstract: To implement the temperature measurement of a cavity in the space cryogenic radiometer based on a temperature resistance, the measuring accuracy and measuring stability of the electronic system in the radiometer was researched. By taking the scheme design and device selection into account, a new precise voltage measuring system was proposed based on an ultralow noise accuracy voltage reference source (LTZ1000), a four wire germanium resistance (GR1400-AA) and a 24 bit analog to digital converter (24 bit AD). Then, the noise ratio for the entire system was calculated in theory, and the temperature characteristics and the amplitude frequency response of the system were simulated by using TINA-TI. Finally, the experiment on measuring temperature accuracy and long-term stability for this system was performed at the 77 K constant temperature environment. The experimental results show that the actual sampling voltage of germanium resistance is within 100 μV , and the long-term stability is lowered to 1×10^{-5} . Moreover, the temperature measurement accuracy of system is

收稿日期: 2015-03-12; 修订日期: 2015-04-20.

基金项目: 国家自然科学基金科学仪器基础研究专项基金资助项目 (No. 41227003)

less than 4 mK, meanwhile, the temperature stability is up to 1×10^{-5} . So, the proposed precise temperature measurement system basically meets the needs of space cryogenic radiometer for long-term stability and measurement accuracy.

Key words: cryogenic radiometer; germanium resistance; voltage measurement; reference source with high accuracy; 24 bit Analog to Digital converter

1 引言

随着空间遥感技术的发展,近些年国内外已经把红外波段遥感仪器搭载在气象、资源、环境等遥感卫星上,并送入太空。传感器能否提供有价值的信息,取决于传感器的设计、性能和光辐射准确测量能力,因此需要对传感器进行绝对辐射定标。

近些年卫星遥感对辐射定标的精度要求越来越高,传统方法难以满足要求。从 20 世纪 90 年代开始,一些国家开始以低温辐射计为初级标准,进行高精度光辐射定标和标准传递的研究。由于低温辐射计综合利用了电替代、液氮液氦双层冷屏蔽和超导等先进技术,使其光辐射测量达到较高的精度^[1-7]。

空间低温辐射测量为低温环境下的精密测量,在电子学上可实现基于小电阻的电压精密测量,传统方法包括交流测量和直流测量。

交流测量利用正弦信号调制待测小电压信号,用数字解调方式还原采样信号。美国加利福尼亚的 LEVINE 等人基于交流测量的方式,在 90 K 以下对铯电阻进行了精密测量,测量精度达到 ± 3 mK^[8];西班牙的 Cuadras 等人基于相敏检波的方式实现了高分辨率的人体温度采集,在 0°C 附近测量精度达到 0.5 mK^[9]。但该方法难以消除现场可编程门阵列(FPGA)产生的同频信号与源载波的相差。

直流测量法的基准源采用恒流源或恒压源,将待测电阻通过四线法接入,德国的 Hans 采用直流测量法在 $-20 \sim 50^\circ\text{C}$ 进行了测量,测温分辨率达到 10 mK^[10]。西北工业大学的 FangYixi 等人基于直流电桥放大的方式进行精密温度测量,测温精度达到了 7 mK^[11]。但该方法受限于基准源和模数转换器参考电压的信噪比和长期稳定度,导致待测信号的实际采样值存在温度漂移,且该误差无法修正。

针对上述问题,本系统选择超低噪稳压源 LTZ1000ACH 作为基准源,设计了控温效果极佳的外围电路,产生长期稳定性达 1×10^{-6} 的 7.13 V 直流电压信号,测温电阻选用低温下性能优良的四线制锗电阻 GR1400-AA;并提出了对偶相消的方式,将测温电阻和高精密参考电阻上的采样值同时接入一对已利用精密电阻完成调谐的仪表放大器 INA101,有效消除了参考电压上的温度漂移,改进了测量相对不确定度,最后利用 FPGA 控制 24 位模数转换器 LTC2400 工作时序,完成二级滤波后信号的数字采样,并通过串口传递给上位机。

2 电子学精密测温系统的构成及原理

测量系统结构如图 1 所示。

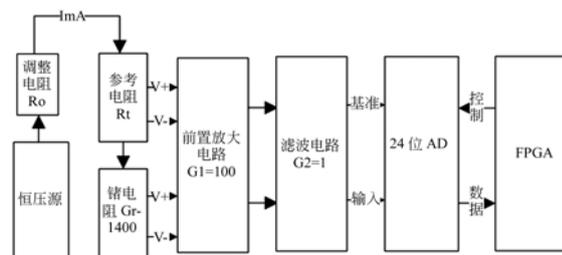


图 1 精密电压测量系统结构图

Fig. 1 Block diagram of measuring system

2.1 超低噪基准源的硬件设计

恒压源采用凌特公司生产的 LTZ1000ACH,其片内集成了温度传感器和加热器,温度系数达到 $0.05 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 。齐纳管采用了深埋技术,PN 结在硅片表面以下一定深度免受外界污染,电压稳定度达到 1×10^{-6} 。

LTZ1000 的外围电路设计如图 2 所示, R_1 给稳压管提供偏置电流,从 3、7 脚就近获取稳定电压,运放 A_2 同向和反向接 4、5 脚。当输出电压增大时, R_1 电压变大, Q_1 基极电流增大,导致

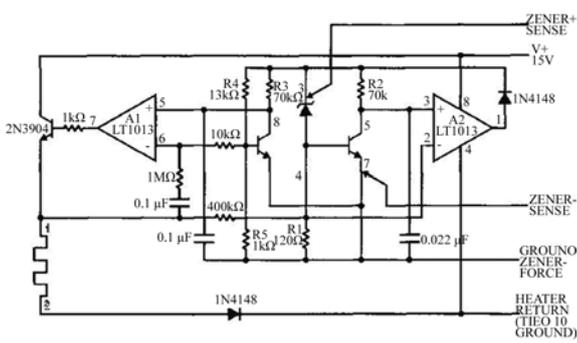


图 2 LTZ1000 电路结构图

Fig. 2 Electronic block diagram of LTZ1000

Q_1 集电极的电流增大,集电极电压减小,运放 A_2 输出电压降低,3、7 脚输出电压降低,形成负反馈,输出电压变小的反馈过程类似。其中 R_1 和 R_2 选择 RJ711 的精密电阻,当 R_1 变化 1×10^{-4} 时,输出电压变化 1×10^{-6} , R_2 变化 1×10^{-4} ,导致输出电压变化 0.3×10^{-6} 。

Q_2 和运放 A_1 用于恒温控制,be 极的 PN 结具有约 $-2.0 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ 的温度系数,线性度和稳定性较好,用于温度检测, R_1 、 R_5 分压后得到电压等于恒温下 Q_2 的 be 极电压。当温度升高时, Q_2 的 be 极电压降低,基极电流增大,集电极电流增大,集电极电压降低。导致运放 A_1 输出电压降低,驱动管 2N3904 电流减少,加热线圈功率下降,恒温温度下降,形成负反馈。该电路的温度控制精度达到 0.001°C 以上,保证输出电压温度系数的 $0.05 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 指标。^[12-13]

R_1 、 R_5 的分压决定了恒温温度,选择 RJ711 的高精密电阻,取 $R_1 = 10 \text{ K}$, $R_5 = 1 \text{ K}$,设置恒温温度约为 38°C 。驱动管选用电流较大的三极管 S9013。使恒温控制和稳压电路的供电电源取自电路的 7 V 稳压输出,最大限度地减少了供电电压变化对电路的影响。

LTZ1000 的印刷电路板(PCB)设计用类似于纳粹符号的结构孤立,以提高 PCB 的热阻,减少外界环境对 LTZ1000 的影响。周边用大面积铜箔匀温。发热元件 S9013 和 1N4007 远离关键元件并且在适当的位置加阻热开孔,减少发热对电路关键元件的影响。整个 PCB 面积较大,利于散热,可以减少元件之间的影响。

2.2 对偶相消式采样电路的设计

空间低温辐射计对测温精度的要求达到了

$10 \mu\text{K}$ 级,需要选择电阻与温度变化比率高,电阻噪声低,重复性好的热敏电阻,目前可采用的热敏电阻中,铂电阻在 20 K 左右低温下的重复性不好,铈铁电阻在低温下电阻变化率与温度变化率的比值较小,测量难度较大,锗电阻温度特性如表 1 所示,性能指标更好,试验中选择高精度高可靠的锗电阻传感器 Germanium GR-1400-AA^[14]。

表 1 锗电阻温度传感器阻值温度特性表

Tab. 1 Result of germanium GR-1400-AA

| 温度 T/K | 阻值/ Ω | $dR/dT/(\Omega \cdot \text{K}^{-1})$ |
|--------|--------------|--------------------------------------|
| 10 | 252.8 | -61.95 |
| 20 | 44.19 | -5.41 |
| 30 | 17.18 | -1.23 |
| 77.4 | 3.55 | -0.05 |

参考电阻采用 718 厂定制的精度为 5×10^{-6} 的金属箔四线制直插电阻,做好密封,保证测量结果稳定。

系统要求热敏电阻和参考电阻偏置电压和热噪声尽可能接近,经过逐级放大抵消误差。前置放大电路采用仪表放大器,一般仪表放大器不提供偏置电压调零端,选用单片芯片双运放的器件也很难保证参数很接近。所以选用带偏置电压调零端的精密仪表放大器 INA101,通过精密变阻器反复调整,对输出信号比对测试,实现两路信号精确同步。具体电路设计如图 3 所示。

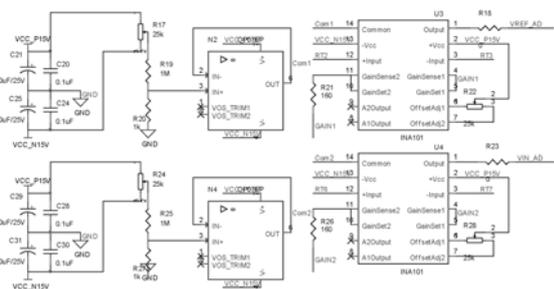


图 3 采样电路的设计

Fig. 3 Design of sample circuit

前级电压信号较小,电路板上任何小的工频噪声和数字信号噪声都会在后级产生较大影响,在 PCB 设计中重点考虑前级信号的隔离,除了在连接电源处增加了旁路电容,还将数字电路和模拟电路的地分开单点接地,最后对于输入差分信

号采用差分走线以保证等长。

2.3 高分辨率采样与信号处理电路设计

AD 转换芯片的采样速率和分辨率相互制约,系统对于测量精度的要求远远高于采用速率,采用凌特公司生产的高精度 24 位 AD 转换器 LTC2400,该芯片内部集成有振荡器,工作电压为 2.7~5.5 V,积分线性误差为 4×10^{-6} ,RMS 噪声为 0.3×10^{-6} ,采用与 SPI 接口兼容的三线数字接口,可用于高分辨率和低频,在采样频率低于 50 Hz 时,实际有效位数达到 21 位,电路结构简单,当采用内部振荡器时,芯片内部数字滤波器能抑制 50 Hz 及其谐波,对输入信号中的工频干扰达到大于 110 db 的抑制,转换时间为 160 ms,满足使用要求^[15-17]。

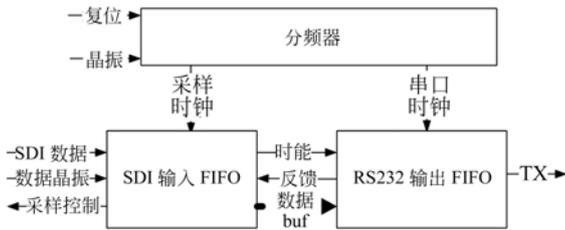


图 4 FPGA 设计结构图

Fig. 4 Block diagram of FPGA design

采样过程通过 CS 使能端控制,数据传输时序通过 SCLK 信号控制,实际设计中通过 FPGA 实现 SPI 接口转化为 RS232 接口,传输给上位机。FPGA 采用 X3C400-4PQ208,具体结构如图 4 所示。

3 测量实验与结果

3.1 链路信噪比的理论计算与分析

恒压源采用 LTZ1000ACH,通过调零电阻产生基准电流 $I = 1 \text{ mA}$,恒压源电压精度为 1×10^{-6} ,调零电阻采用 718 厂订制的 RJ711,阻值精度为 5×10^{-6} ,基准电流的精度取合成相对不确定度:

$$u_i = \sqrt{u_n^2 + u_r^2} = \sqrt{(1 \times 10^{-6})^2 + (5 \times 10^{-6})^2} = 5.1 \times 10^{-6}. \quad (1)$$

参考电阻和锗电阻采用四线制接法,前者采用 718 厂订制的 RJ711,后者采用 LAKESHORE 采购的 GR1400-AA,参考电阻测量精度和温度稳

定性相对不确定度均可达 5×10^{-6} 。总链路电阻合成不确定度:

$$u_R = \sqrt{u_{Gr}^2 + u_{Rt}^2} = \sqrt{(5 \times 10^{-6})^2 + (5 \times 10^{-6})^2} = 7.1 \times 10^{-6}. \quad (2)$$

77 K 恒温条件下,GR1400-AA 的电阻 $R_{Gr-1400-AA|80K} \approx 5 \Omega$,当基准电流 $I = 1 \text{ mA}$ 时,其两端采样电压 $V_{Gr1} = R_{Gr-1400-AA|80K} \times I = 5 \text{ mV}$,采样电压经过由一对高精度仪表放大器 INA101 组成的前置放大电路,前置放大电路的偏置电压经过可变电阻单独调零,INA101 的输入电压噪声达到 $e_{nl} = 10 \text{ nV}_{p-p}$;电流噪声达到 $I_{os1} = 50 \text{ pA}$,本级输入电阻 $R_{in1} = 5 \Omega$,滤波电阻网络取值均不超过 500Ω ,按照 100 kHz 带宽计算,电阻热噪声产生的相对不确定度为:

$$e_{r1} = \sqrt{4KTRf} = \sqrt{4 \times 1.38 \times 10^{-23} \times 300 \times 500 \times 10^5} = 0.91 \times 10^{-6}. \quad (3)$$

最大本级放大电路合成相对不确定度为:

$$u_{amp1} = \sqrt{u_{v1}^2 + u_{i1}^2 + e_{r1}^2} = \sqrt{\left(\frac{e_{nl}}{V_{Gr}}\right)^2 + \left(\frac{I_{os1} \times R_{in1}}{V_{Gr1}}\right)^2 + (4KTRf)^2} = \sqrt{\left(\frac{10\text{nV}}{5\text{mV}}\right)^2 + \left(\frac{50\text{pA} \times 5\Omega}{5\text{mV}}\right)^2 + (0.91 \times 10^{-6})^2} = 2.23 \times 10^{-6}. \quad (4)$$

滤波电路采用低偏置电压低噪声精密放大器 OP07,集成运放的输入电压噪声能做到 $e_{n2} = 1 \mu\text{V}_{p-p}$,折合到前级输入为 100 nV,本级电压稳定值 $V_2 = G_1 \times V_{Gr} = 4.419 \text{ V}$,电流噪声 $I_{os2} = 20 \text{ nA}$,增益 $G_2 = 1$,本级输入电阻 $R_{in2} = 250 \Omega$,前级放大增益 100 倍,计算得到本级放大电路合成相对不确定度:

$$u_{amp2} = \sqrt{u_{v2}^2 + u_{i2}^2} = \sqrt{\left(\frac{e_{n2}}{G_1 \times V_{Gr1}}\right)^2 + \left(\frac{I_{os2} \times R_{in2}}{G_1 \times V_{Gr1}}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{1\mu\text{V}}{100 \times 44.19\text{mV}}\right)^2 + \left(\frac{20\text{nA} \times 250\Omega}{100 \times 44.19\text{mV}}\right)^2} = 1.3 \times 10^{-6}. \quad (5)$$

模数转换电路部分采用 LTC2400,其实际有效位数为 20 位,测量精度达 1×10^{-6} ,适当放宽

取合成相对不确定度 $u_{ad} = 2 \times 10^{-6}$, 参考电压信号和待测电压信号经过对偶相消得放大电路, 使得模数转换器上基准电压的温度漂移和噪声对实

测电压值的影响被有效抵消掉了。

综上, 整条链路的五项测量不确定度因素, 总电阻精度的合成相对不确定度为:

$$u = \sqrt{u_i^2 + u_{R1}^2 + u_{amp1}^2 + u_{amp2}^2 + u_{ad}^2} = \sqrt{(5.1 \times 10^{-6})^2 + (7.5 \times 10^{-6})^2 + (2.2 \times 10^{-6})^2 + (1.3 \times 10^{-6})^2 + (2 \times 10^{-6})^2} = 9.64 \times 10^{-6}. \quad (6)$$

实际电路采用对偶相消的方式, 同时发生在参考电阻与铯铁电阻上的温度漂移和噪声被同步化, 相当于抵消了其中一个电阻的带来的误差源, 因此式(2)可以优化为:

$$u_R = \sqrt{u_{G+R1}^2 + u_{G-R1}^2} = \sqrt{(5 \times 10^{-6})^2 + (0 \times 10^{-6})^2} = 5 \times 10^{-6}. \quad (7)$$

最终总电阻精度的合成相对不确定度优化为:

$$u = \sqrt{u_i^2 + u_R^2 + u_{amp1}^2 + u_{amp2}^2 + u_{ad}^2} = \sqrt{(5.1 \times 10^{-6})^2 + (5 \times 10^{-6})^2 + (2.2 \times 10^{-6})^2 + (1.3 \times 10^{-6})^2 + (2 \times 10^{-6})^2} = 8.24 \times 10^{-6}. \quad (8)$$

该测量电路的电子学测量不确定度理论上小于 1.0×10^{-5} , 满足空间低温辐射计对于电子学精密测温系统的指标要求。

3.2 基于 TINA 软件的仿真与分析

TINA 是 TI 公司实验室推出的一款免费模拟电路性能仿真分析软件, 首先基于 TINA 对于本温度采集系统进行了模拟搭建和仿真, 只针对模拟电路部分进行了信噪比分析, 如图 5 所示, 在不考虑利用对偶消除方法, 抵消恒压源和 AD 基准源噪声的情况下, 基于试验所选用模拟放大器件进行仿真分析, 得到整个链路信噪比在 100 kHz 以内达到 90 dB 以上, 折合成测量不确定度为 2.5×10^{-5} 。

情况下随着环境温度变化, 精密电压测量会出现漂移。本系统的 AD 测温基准和热敏电阻输入信号分别取自同一恒压源, 且经过相同放大电路和滤波电路, 抵消模拟信号从基准源带入的噪声和温漂, 以及信号逐级放大从放大器引入的温漂。AD 输出码值为:

$$N = \frac{V_{gr} \times 2^{24}}{V_{ri}}. \quad (9)$$

如图 7 所示, 通过 TINA 对于整个系统 AD 基准电压和模拟输入电压进行了温度分析, 二者温漂趋势一致, 且变化比接近, 由式(9)可知, 温度变化的影响相互抵消, 采样码值能保证几乎稳定。

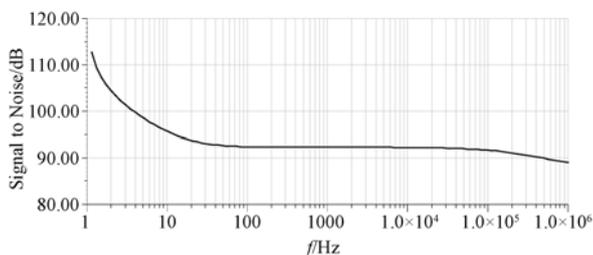


图 5 TINA 仿真信噪比分析

Fig. 5 NOISE RATE simulate result of TINA

该结论与式(6)进行比较可以看出, 本系统采用对偶相消的方法, 抵消恒压源和 AD 基准源噪声使得整个链路测温精度提升了 1.5×10^{-5} 。

进一步对系统温度漂移特性进行仿真, 通常

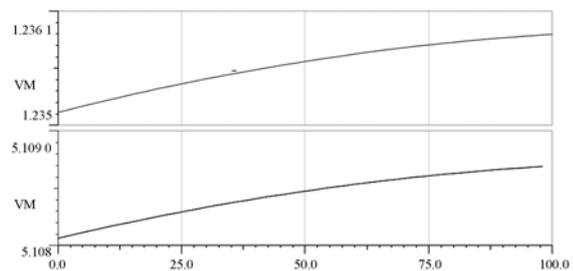


图 6 TINA 温度变化分析

Fig. 6 Temprate simulation result of TINA

3.3 低温环境实测

在 77 K 液氮恒温环境下, 对于该精密测温系统进行了 7 h 以上的实际测试。LTZ1000 基准源输出结果如图 7 所示, 短期测量稳定性较好, 输出

电压波动范围在 $50 \mu\text{V}$ 以内;长期来看随着外界环境变化会向下有较大的抖动,存在一定的温度漂移,计算得测量相对不确定度达到 5×10^{-6} ,这与前面提到的 LTZ1000ACH 长期不确定度值 1×10^{-6} 相距较大,需要通过电路设计改进。

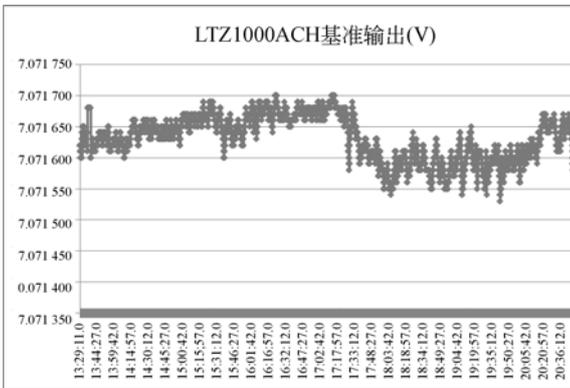


图 7 LTZ1000 输出测试结果

Fig. 7 Output of LTZ1000

针对 LTZ1000ACH 的长期稳定度可能随着环境变化发生漂移,将采样信号和基准信号同时从 LTZ1000ACH 中分压得到,将基准电压温度漂移误差和采样电压的温度漂移抵消,最后在 24 位 AD 输出相对稳定的码值。如图 8 所示, LTC2400 输出结果短期相对稳定,最大波动只有 6 个码,查阅芯片手册, LTC2400 相当于 20 位精度(最后 4 位是估计值)。

从长期稳定性来看,与图 7 对比, LTC2400 输出码值并没有明显的向下漂移过程。长期相对不确定度达到 8.5×10^{-6} 。通过对偶相消的方式有效降低了采样的相对不确定度。

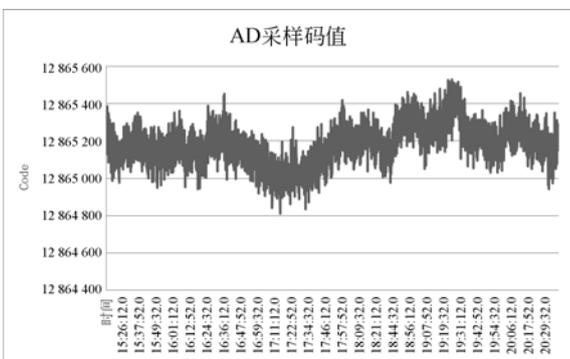


图 8 LTC2400 采样码值

Fig. 8 Output code of LTC2400

根据表 1 给出的 77.4 K 环境下,铱铁电阻的阻值和温度变化率,将 AD 输出码值换算成实测温度曲线。如图 9 所示,在 77 K 液氮环境下,采样值稳定度很高,测温波动在 4 mK 内,相对合成测量不确定度达到 8.41×10^{-6} 。

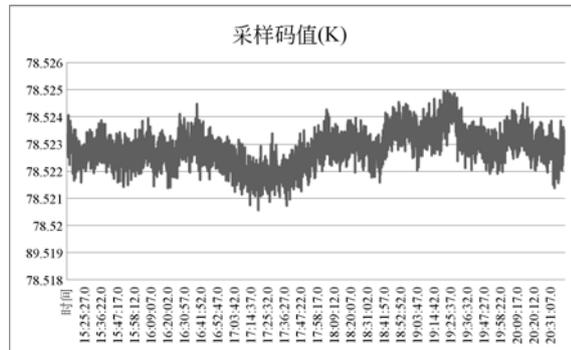


图 9 采样输出值

Fig. 9 Output of temperature

3.4 试验小结

如式(6)所示的理论计算中,不考虑将采样信号和基准信号同时从 LTZ1000ACH 中分压,并抵消基准电压温度漂移误差和采样电压的温度漂移的方式。得到系统理论的相对合成不确定度为 9.64×10^{-6} 。

实际电路采用对偶相消的方式,有效的抵消了前级电路的温度漂移情况,优化后合成不确定度为 8.24 ppm,实测温度的不确定度为 8.41 ppm,与式(8)一致,优于式(6)中的结果。

4 结 论

空间低温辐射计的测温系统对于测温精度和稳定度有着很高的要求,其中对于电子学测量系统中的电阻精密测量有具体指标要求,要求测量不确定度达到 1.0×10^{-5} 。目前已有的纳伏小电压或者微欧小电阻等小信号的测量方式,受已有元器件工艺水平限制,功率噪声和温度漂移很难消除,对小信号测量结果影响较大,很难克服环境波动对于基准源的影响。

本文将 AD 基准源和采样信号采用同源同回路的设计方法,对偶地抵消了环境波动的影响,采用超低噪声基准源 LTZ1000 作为基准,对其 PCB 采用了特殊处理;热采样电阻选择了低温性能更

理想的锗电阻,同时辅以高精度 AD,实现了较为理想的小信号测量。提出了符合测量指标的测温方案,并且进一步通过链路信噪比理论计算和 TINA 温度漂移仿真,验证了该设计方案的可行性,并实际进行了低温环境下测试和分析,最终测

试结果电压抖动为 $100 \mu\text{V}$,采样温度精度在 4 mK ,稳定性达到 1.0×10^{-5} 以内,测量结果良好,符合空间低温辐射计测温系统电子学测温电路的最初设计要求,通过进一步的恒压源电路设计和器件选型等,测量结果还有优化空间。

参考文献:

- [1] 吕正. 低温辐射计在我国的发展现状[C]. 中国光学学会学术大会,2004.
LV ZH. Cryogenic radiometer in the development of the status quo[C]. *China Optical Society conference*, 2004. (in chinese).
- [2] MARTIN J E,陈遐举. 用于辐射绝对测量的超低温辐射计[J]. 国外计量,1986(3):60-63.
Martin J E, CHEN X J. for the absolute measurement of the radiation of ultra low temperature radiometer [J]. *Foreign Measurement*, 1986(3):60-63. (in chinese)
- [3] 林延东,吕亮,李奇. 低温辐射计的温度测量的研究[C]第十一届全国光学测试学术讨论会论文 2006.
LIN Y D, LV L, LI Q. Cryogenic radiometer on Eleventh [C]. *National Conference on optical measurement papers*, 2006. (in chinese)
- [4] DATLA, STOCK K, PARR A C, 等. 辐射功率测量的标准探测器低温绝对辐射计的特性[J]. 环模技术, 1994(3):40-47.
DATLA R U, STOCK K, PARR A C. *et al.*. Standard detector for low temperature radiation power measurement of the absolute radiometer characteristics [J]. *Ring Diotechnology*, 1994(3):40-47. (in chinese)
- [5] 杨振岭,方伟,宋宝奇. 真空环境中太阳辐照度绝对辐射计腔温响应的变化及其影响[J]. 光学学报, 2013,33(9):0912008-1-6.
YANG ZH L, FANG W, SONG B Q. in vacuum solar irradiance absolute radiation change and influence meter temperature response of cavity [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013,33(9):0912008-1-6. (in Chinese)
- [6] 杨振岭,方伟,王凯,等. 小视场绝对辐射计视场测量及修正项计算[J]. 光学精密工程, 2013,21(4):870-876.
YANG ZH L, FANG W. Small field Wang Kai absolute radiometer field measurement and correction calculation of [J]. *Opt. precision Eng.*, 2013,21(4):870-876. (in Chinese)
- [7] 王伟. 腔型绝对辐射计的电压校准测量系统的设计[J]. 光学精密工程,1992(2):71-73.
WANG W. Design of absolute cavity radiometer electrical calibration measurement system design [J]. *Opt. Precision Eng.*, 1992(2):71-73. (in Chinese)
- [8] LEVINE P D, JAEGER K B. Precision Measurement of Temperature Below 90K [P] CPDM, 1998.
- [9] ÀNGEL C, ÓSCAR C. High Resolution Temperature Measurement [J] IEEE, 2004, 7803-8692
- [10] VOLKER H. High Accuracy Measuring Method of Absolute Temperatures Using Thermistors [P]. 2005
- [11] FANG Y X, ZHOU L K. A High-precision temperature measurement system based on noise cancellation [J]. *IEEE*, 2013
- [12] 陈斌,陈素颖,程健. 高精度直流传感器 DCCT 标准测试系统- [J]. 中国物理 C, 2008(S1):43-45.
CHEN B, CHEN S Y, CHENG J. High precision DC sensor DCCT standard test systems [J] *Chinese Physics C*, 2008 (S1):43-45(in Chinese)
- [13] 王刚,兰江,陈乐. 一种脉宽调制的高稳定连续可调直流电压源 [J]. 计量学报, 2014, 35(2):105-108.
WANG G, LAN J, CHEN Y. a pulse width modulation with high stability and continuous adjustable DC voltage source [J]. *Measurement Journal*, 2014, 35(2):105-108. (in Chinese)
- [14] 程兆兰,张龙生. 2-100K 标准锗电阻温度计的电阻—温度特性的测试[J]. 计量技术, 1984(1):25-29.
CHENG ZH L, ZHANG L SH. 2-100K standard germanium thermometer resistance temperature characteristic test [J]. *Measurement Technology*, 1984(1):25-29(in Chinese)
- [15] 李海亮. 24 位 A/D 转换器 LTC2400 及其应用[J]. 电子设计工程, 2003(12):44-45.
LI H L. 24 bit A/D converter LTC2400 and its ap-

- plication [J]. *Electronic Design Engineering*, 2003 (12):44-45. (in Chinese)
- [16] 宋清民, 马涛. 基于 LTC2400 的分布式高精度数据采集系统的设计[J]. *微计算机信息*, 2006 (5):127-130.
- LAI Q M, MA T. Based on distributed LTC2400 high precision data acquisition system design [J]. *Micro Computer Information*, 2006(5):127-130(in Chinese)
- [17] 薛世润, 高晓丁. 基于 LabVIEW 的直流微电阻测量仪[J]. *工业仪表与自动化装置*, 2014(4):105-107
- XUE SH R, GAO X D. A LabVIEW DC micro resistance measuring instrument of industrial instrumentation and automation device based on[J]. *Industrial Instrumentation and Automation*, 2014 (4):105-107. (in Chinese)

作者简介:



宋宝奇 (1985—), 男, 辽宁抚顺人, 硕士, 助理研究员, 分别于 2008 年、2011 年在北京大学获得学士、硕士, 主要从事太阳辐射计量和嵌入式软件开发等方面的研究。E-mail: songbaoqipku04@126.com



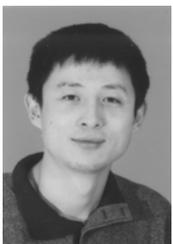
杨东军 (1979—), 男, 山东莱芜人, 博士, 助理研究员, 2005 年于大连理工大学获得硕士学位, 2012 年于中科院长春光机所获得博士学位, 主要从事太阳辐射计量及微弱信号监测方面的研究。E-mail: djyang0827@163.com



方伟 (1965—), 女, 辽宁锦州人, 博士, 研究员, 1997 年于中科院长春光机所获得硕士学位, 2005 年于中科院长春光机所获得博士学位, 现为 FY-3 卫星太阳辐射监测仪主任设计师, 主要从事太阳辐射计量研究。E-mail: Fangw@ciomp.ac.cn



姜明 (1986—), 男, 黑龙江省哈尔滨市人, 硕士, 助理研究员, 分别与 2008 年、2011 年在北京航空航天大学获得学士、硕士学位, 主要从事太阳辐射计量和机械结构设计等方面的研究。E-mail: jiangming8631@126.com



叶新 (1979—), 男, 吉林省吉林人, 硕士, 副研究员, 分别于 2002 年和 2005 年于中国科技大学获得学士、硕士学位, 主要从事太阳辐射计量及电子学系统设计等方面的研究。E-mail: newsyears@ustce.edu

(版权所有 未经许可 不得转载)