

微型化绝对辐射计前置锁相放大系统的设计

叶新, 方伟, 杨东军, 王凯

(中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 长春 130033)

摘要: 长春光机所研制的绝对辐射计根据光电等效原理, 用可精确电功率实时定标未知的入射光辐射功率; 辐射计采用金刚石片做衬底, 利用 MEMS 技术在金刚石片上集成了加热丝、热敏电阻, 金刚石片和热沉之间产生温差, 该温差可通过电桥电路测量; 文章介绍一种应用于微型化的新型绝对辐射计前置锁相放大系统, 该系统采用锁相放大的方法, 通过交流电压激励电路可以消除传统绝对辐射测量的直流误差和由于器件温度漂移引起的误差, 同时抑制交流频率外的噪声, 信噪比提高了 10dB, 使新型电替代辐射计的绝对定标精度得到很大的提升。

关键词: 微型化绝对辐射计; ESR; 电桥; 锁相放大

Design of Phase-Locked Preamplifier for Micro Absolute Radiometer

Ye Xin, Fang Wei, Yang Dongjun, Wang Kai

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

Abstract: The absolute radiometer can achieve the accurate calibration of unknown real-time power of light radiating with the subject of electric power. The apparatus integrates heating wire, thermistor. Two temperature sensing bridge thermistors are placed at both ends of the bolometer so that the electrical system regulates the temperature of the strip ends and the replacement heat. This paper presents a new application of micro absolute radiometer that uses lock-in amplifier method, which greatly reduces the random noise on the system. the method makes absolute calibration accuracy of the new electrical substitution radiometer (ESR) system greatly improved.

Key words: micro absolute radiometer; ESR; bridge signals; lock-in amplifier

0 引言

长春光机所研制绝对辐射计^[1]已有 20 年历史, 达到世界先进水平, 参加 IPC 国际日射计比对^[2]3 次, 获得数据与世界辐射基准数据符合良好。本文涉及的新型光电探测器 ESR 就是采用微机械技术把绝对辐射计微型化后引入光谱仪定标系统^[3], 给仪器提供长期实时的绝对标准。ESR 的关键技术是在保证精度的前提下缩短时间常数, 测辐射热计采用金刚石片, 两组 50kΩ 热敏电阻粘贴在该表面上; 100kΩ 的加热丝固定在金刚石条的背面, 提供电加热替代在金刚石片和热沉之间产生温差, 该温差可通过电桥电路进行测量。温差测量的精度直接影响整个系统的定标精度水平。为了提高温差测量的精度, 本文介绍了一种应用于新型电替代辐射计 ESR 的前置锁相放大系统, 该装置采用锁相放大的方法, 通过交流电压激励电路以消除系统中器件的直流误差及温升带来的误差, 同时抑制交流频率外的噪声, 使新型电替代辐射计的绝对定标精度得到很大提升。

1 电桥温差测量电路设计原理

如图 1 所示, 光电探测电桥温差测量电路由两个测辐射热计组成, 其中一个作为工作测辐射热计接受光谱辐射照射, 另一个则作为参考测辐射热计, 用作桥接电路的热电参考组件; 它们工作在相同的热环境中, 降低温度漂移对测量带来的影响。ESR 两个热敏电阻 (R_1 和 R_2) 和两个平衡电阻 (R_3 和 R_4)

构成四臂电桥, $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = R$ 。当工作测辐射热计接受光谱辐射或加热时, 测辐射热计产生温差, 桥式电路的温差信号的检测数值, 记为 $f(\xi)$ 。

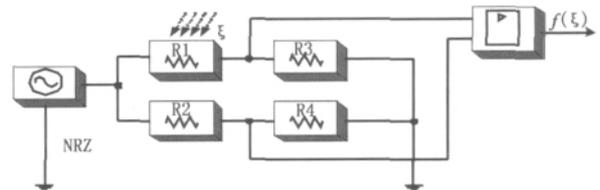


图 1 光电探测电桥温差测量电路

$$\begin{cases} f(\xi) = A \cdot (S(\xi) + N_T) \\ N_T = \left(E_{nr}^2 + [E_n(\frac{1}{f})]^2 + [E_n(B)]^2 \right)^{\frac{1}{2}} \\ S(\xi) = U \cdot \left(\frac{R_3}{R_1 + \xi + R_3} - \frac{R_2}{R_2 + R_4} \right) \\ \approx \frac{U}{4} \cdot \frac{\xi}{R} \\ E_{nr} = (4KTR_s B)^{1/2} \end{cases} \quad (1)$$

式 (1) 中, R_1 为工作测辐射热计上的热敏电阻值; R_2 为参考测辐射热计上的热敏电阻值; R_3 、 R_4 为电桥平衡电阻值; U 为电桥两端电压; ξ 表示工作测辐射热计接受光谱辐射后的电阻变化; $S(\xi)$ 为理想的温差信号; N_T 为系统的总噪声; T 为绝对温度; R_s 为源内阻; B 为系统带宽; K 为波尔兹曼常数; A 为放大器增益; E_{nr} 为系统的源电阻热噪声; $E_n(B)$ 为运算放大器的白噪声; $E_n(\frac{1}{f})$ 为运算放大器 $1/f$ 噪声。

收稿日期: 2012-03-12; 修回日期: 2012-05-12。

基金项目: 国家自然科学基金 (61077080/F050406)。

作者简介: 叶新 (1979-), 男, 吉林人, 硕士, 助理研究员, 主要从事弱信号检测及电子技术应用方向的研究。

运算放大器的白噪声 $E_n(B)$ 与 $1/f$ 噪声 $E_n(\frac{1}{f})$ 不相关, 并且系统源电阻噪声和运放噪声不相关, 由此可以计算出系统的总噪声 N_T . 理想的温差信号 $S(\xi)$ 通过桥电路的计算就可以获得。

对于温差信号 $S(\xi)$ 的获取, ESR 的前置信号放大系统一般采用直流桥路信号放大方法。

1.1 直流桥路信号放大分析

直流桥路信号放大系统^[4]采用直流电压激励信号对桥路信号进行测量, 其噪声带宽为测量系统的总带宽。

根据 (1), 得到常温下的信噪比为:

$$SNR_{\text{直流}} = \frac{S(\xi)}{N_T} = \frac{\frac{U}{4} \cdot \frac{\xi}{R}}{\{4KTR_s B + [E_n(\frac{1}{f})]^2 + [E_n(B)]^2\}^{1/2}} \quad (2)$$

式 (2) 中, $R_1, R_2, R_3, R_4, K, R_s, U$ 均为常数。可以看到, 直流桥路信号放大系统测量系统的信噪比主要由工作测辐射热计接受光谱辐射后的电阻变化 ξ , 绝对温度 T , 系统总带宽 B 决定。所以如果要提高系统的测量精度, 则必须采用两种方法, 一个就是尽量加大 $S(\xi)$ 的数量, 但是该数值是受到光谱辐射强度限制的。另一个方法是尽可能降低 N_T , 以加大检测的信噪比。

1.2 直流桥路信号放大系统抑制噪声的方法

由式 (2) 中可以看到, 直流桥路信号放大系统抑制总噪声可以从以下方面着手。

(1) 抑制 E_{nr} — 系统的源电阻热噪声

由式 (1) 可知, 可以得到抑制 E_{nr} 的基本方法, 即降低系统带宽和源内阻阻抗。源内阻阻抗是受到系统设计原理限制的, 所以可以通过限制系统带宽来减低热噪声。

(2) 抑制放大器的噪声

由式 (2) 可知, 为了抑制放大器噪声对信噪比的影响, 必须选择低噪声的前置放大器。

由上面分析可知, 噪声带宽是决定系统的信噪比的最重要因素。

2 电桥温差前置锁相放大测量算法

新型电替代辐射计 ESR 的电桥温差前置锁相放大系统^[5]通过压缩调制频带外的噪声来提高系统的信噪比, 提高测量的精度。

2.1 锁相放大的相关原理

设 $f(t)$ 是噪声的余弦信号, 信号和噪声相关性较小

$$f(t) = S(t) + N_T(t) = A_1 \cos(\omega t) + N_T(t) \quad (3)$$

其参考信号为:

$$y(t) = A_2 \cos(\omega(t + \tau)) \quad (4)$$

其互相关函数为:

$$R_{fy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T f(t)Y(t)dt = \varphi_{Sy}(\tau) + \varphi_{N_T y}(\tau) \quad (5)$$

由于参考信号与随机噪声相关性较小, 所以 $\varphi_{N_T y}(\tau)$ 可以忽略不计, 因此可以得到:

$$R_{fy}(\tau) = \varphi_{Sy}(\tau) = \frac{1}{2} A_1 A_2 \cos(\omega \tau) \quad (6)$$

当 $\tau = 0$, 即输入信号与参考信号同频同相时, 就得到较

为理想的检出信号。

2.2 锁相信号放大系统噪声抑制分析

根据以上结果得到锁相信号放大系统的温差信号的检测表达式:

$$\begin{cases} f(\xi) = R_{fy}(\tau, \xi) \\ x(t) = A_1 S(\xi) \cos(\omega t) + N_T(t) \\ y(t) = A_2 \cos(\omega t + \tau) \\ R_{fy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)Y(t)dt = \varphi_{Sy}(\tau) + \varphi_{N_T y}(\tau) \\ \varphi_{Sy}(\tau) = \frac{1}{2} A_1 A_2 S(\xi) \cos(\omega \tau) \\ \varphi_{N_T y}(\tau) = A_T * \left(E_{nr}^2 + [E_n(\frac{1}{f})]^2 + [E_n(H(f))]^2 \right)^{\frac{1}{2}} + \varphi(\tau) \end{cases} \quad (6)$$

式 (6) 中, 看到经过锁相放大以后, 被检测的信号只在调制频率的带宽内被放大。通过锁定放大器后系统的带宽 B 变为 $H(f)$ 。系统频率外的噪声被极大的衰减, 噪声 $\varphi(\tau)$ 相对于前项可以忽略。这样, 基于式 (2) 和式 (6), 利用锁相放大方法的系统信噪比可以表示为:

$$SNR_{\text{锁定}} = \frac{\varphi_{Sy}(\tau)}{\varphi_{N_T y}(\tau)} = \frac{S(\xi)}{\left(4KTR_s H(f) + [E_n(\frac{1}{f})]^2 + [E_n(H(f))]^2 \right)^{\frac{1}{2}}} \quad (7)$$

式 (7) 中, A_T 为系统增益, 从式 (7) 中可以看到, 通过将带测信号调制到频率 ω 处, 然后再经过锁相放大器, 噪声的带宽可以被极大的窄带化。新型电替代辐射计 ESR 系统的信噪比主要由工作测辐射热计接受光谱辐射后的电阻变化 ξ , 绝对温度 T 及通过锁定放大器后系统的带宽变为 $H(f)$ 决定。

3 电桥温差前置锁相放大器电路设计

由于新型电替代辐射计 ESR 电替代辐射测量的方法实质上是一个光电平衡的过程, 而电桥温差测量就是通过反馈原理得到光辐射的电功率, 温差信号测量的精度直接影响整个系统的指标。如图 2 所示, 电桥温差前置锁相放大电路分为以下两部分: 光电信号检测部分、数字采集和控制部分。

3.1 光电信号检测部分设计

电桥温差前置锁相放大电路的光电信号检测部分是十分重要的, 它决定电平衡的精度, 影响最终的结果, 光电信号检测部分由电桥调制, 信号放大, 相敏检波以及低通滤波部分组成。

如图 2 所示, 在图中左面部分的光电平衡电桥中的一个热敏电阻作为工作测辐射热计接受光谱辐射照射, 另一个热敏电阻用作桥接电路的参考组件, 它们工作在相同的热环境中, 可以降低温度漂移对测量带来的影响。两个测辐射热计的热敏电阻和两个平衡电阻构成了四臂光电平衡电桥。光电平衡桥电路的内阻很大, 输出信号首先送入 AD 公司的 OP249 做跟随输出, 然后再送入前置放大器。平衡电桥电路输出的差分信号比较微弱, 输出的差分信号最小只有几十微伏。光电信号检测部分采用 TI 公司仪表放大器 INA118 作为系统的前置放大器, 该仪表放大器具有输入阻抗高、失调温漂小、共模抑制比高、输入噪声小等优点。

锁相放大由相敏检波器和低通滤波器组成, 其核心是相敏

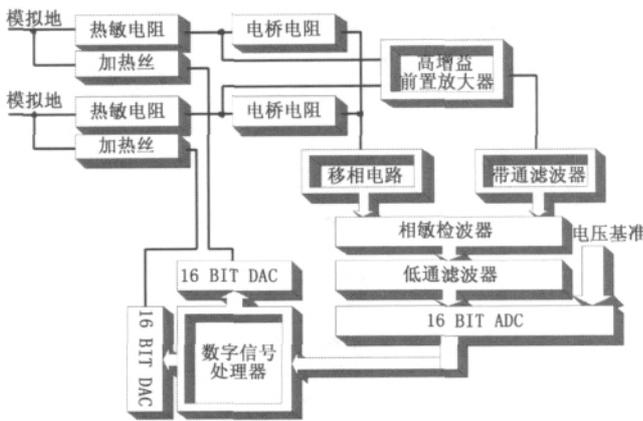


图 2 电桥温差前置锁相放大电路基本组成

检波器。如图 2 中所示，相敏检波器采用高精度同步解调器 AD630。AD630 将放大器的输出信号和参考的信号相乘，从含有干扰噪声的调幅波中精密检出被调制的信号。经 AD630 的输出的信号再经过通带频率小于 10Hz 低通有源滤波器 UAF42，滤掉相敏检波器输出信号中的高次谐波和高频信号。达到降低噪声，提高信噪比的目的。

3.2 数据采集部分和控制部分设计

数据采集部分和控制部分的简图如图 2 所示，此部分根据实际的需求，采用了 TI 公司的 24bit 的 $\Sigma - \Delta$ 型模数转换器 ADS1255。该模数转换器的采样动态范围达到 144dB，完全保证本设计方案的实现。AD 的电压基准则采用 ADR421。中心控制部件不但要完成采集数据的实时提取和分析，还要根据分析的结果对加热平衡部分进行精确的热平衡调节，因此本设计方案选用 TI 公司的 TMS32F2812 作为核心控制部件。TMS32F2812 具有 256K 字节的 FLASH 和 36K 字节的 RAM 和高性能的数据处理能力和强大的 I/O 接口，特别适用于测控场合。

4 实验及结果分析

根据上面的理论论述和电路设计，本文设计的锁相放大测量系统对弱光进行了测量实验。

在热敏电阻为 100kΩ 时，若电桥上加有效值为 10V 交流电压，热敏电阻在 25℃ 时，受温度变化的影响约为： $\Delta R = 2.2k\Omega/^\circ C$ 。当辐射计接收功率为 10^{-5} 瓦时，温升：

$$\Delta T_0 = \frac{P_0}{K} = 10^{-3}^\circ C \quad (8)$$

则电阻变化：

$$\frac{\xi}{R} = \frac{2.2k\Omega/^\circ C}{100k\Omega} \cdot \Delta T = 2.2 \times 10^{-5} \quad (9)$$

根据电桥原理输出：

$$S(\xi) = \frac{U}{4} \times \frac{\xi}{R} = 5.5 \times 10^{-5} V \quad (10)$$

根据运放指标，1/f 噪声：

$$E_{n\frac{1}{f}} = 14nV \sqrt{Hz} \quad (11)$$

此处直流电桥方法的带宽 f 一般为 10Hz 左右。这样放大器的白噪声表示为

$$E_{nB} = 11nV \sqrt{Hz} \quad (12)$$

以上数据代入式 (2-2) 得在 25℃ 直流电桥的信噪比：

$$SNR_{\text{直流}} = \frac{5.5 \times 10^{-5}}{1.33 \times 10^{-7}} = 414$$

而采用锁定放大方法的可以将带宽 f 限定在 0.1Hz 左右，得到锁相信号的信噪比 $SNR_{\text{锁定}}$ 在 1000 以上，提高了系统的测量精度。考虑到实际测量时温度对电桥及测量信噪比的影响，以下对直流桥路信号放大系统和锁相信号放大系统在温度变化时的测量精度进行分析。

光电探测电桥的热敏电阻采用具有负温度系数的半导体电阻，其随温度变化曲线如图 3 所示。当温度的变化范围为 240~330K，带宽 f 在 0.01 到 10Hz 之间时，系统的信噪比的信号如图 4 所示。

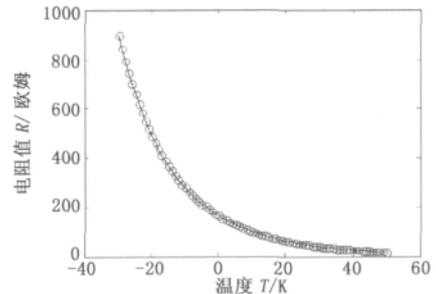


图 3 热敏电阻随温度变化示意图

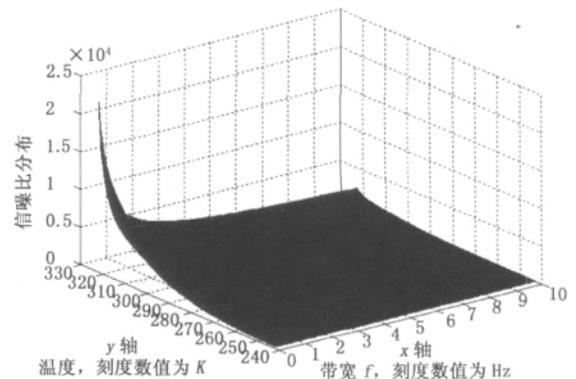


图 4 信噪比同温度及带宽的关系示意图

从图 4 看到，当温度升高时，信噪比在不同的基带都是呈下降趋势的，而且带宽分布越大，信噪比也出现下降的趋势。为了更加清楚地说明锁相信号放大系统和直流桥路信号放大系统在 240~330K 下的测量信噪比分布情况，两个系统根据自身的基本带宽在图 4 的趋势图上分别截取两条曲线进行比较和分析，结果如图 5 所示。

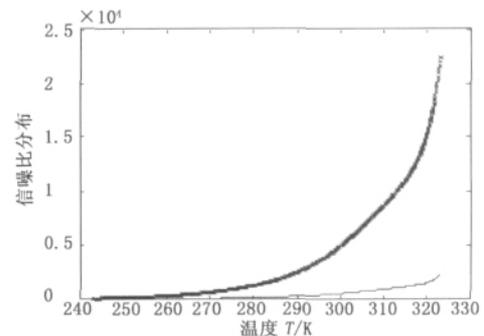


图 5 锁相信号放大系统和直流桥路信号放大系统信噪比比较示意图

两种种算法相比较的结果如表 3。

由表 2, 3 得知, 云自适应遗传算法得出的路径分配结果要比粒子群算法得出的路径分配结果优化很多。尤其是当拓扑结构规模增大时, CAGA 的效果更明显, 比 CAPSO 的效果更好。同一规模的任务图随着各自任务流的不同而存在着差异, 这种差异体现在非固定路径与固定路径的比例的多少。

对于每个任务图来说, 非固定路径的任务流条数最多为 $C_n^1 \times (n \times n - n - (n - 1))$ (n 为拓扑结构规模), 化简后即 $n \times (n - 1)^2$ 。一个任务图里面如果有大量的固定路径的点通讯, 其优化效果就会比较差。G10 任务图是 5×5 的, 由于其中有大量的非固定路径, 所以优化效果相对于其他任务图较好。

4 结论

本文采用了云模型对传统遗传算法加以改进, 自适应调整遗传算法过程中的两个重要参数—交叉、变异概率, 同时引入精英保留策略, 以最小化系统带宽需求和平衡链路负载为目标, 提出能够保证传输时延和吞吐量均衡的 2D—Mesh NoC 路径分配方案。经过验证, 该方法有效地得到了较优的路由路径分配方案, 减小了通讯延时, 提高了系统的吞吐量。尤其是当拓扑结构规模越大时, 优化效果越明显, 本文算法的优势越大。

参考文献:

[1] Kumar S, Jantsch A, Soininen J P, et al. A network on chip archi-

tecture and design methodology [A]. Proceedings of the IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI [C]. Pittsburgh, 2002: 105-112.

[2] Murali S, Micheli G D. Bandwidth—constrained mapping of cores onto NOC architectures [C] //ProcDATE. Paris, France; IEEE Computer Society, 2004 (2): 896-901.

[3] Xu Chuanpei, Yan Xiaofeng, Chen Yuqian. A Technique for NOC Routing based on hybrid particle swarm optimization algorithm. Genetic and Evolutionary Computing [A]. 2009. WEGC'09. 3rd International Conference [C]. 2009 (8): 607-610.

[4] 岳培培, 刘建, 陈杰. 基于遗传算法的 NoC 路径分配算法 [J]. 微电子学与计算机. 2008, 25 (4): 68-71.

[5] D. Shin, J. Kim. Power—aware communication optimization for networks on chips with voltage scalable links [A]. In: CODES+ISSS' 04 [C]. 2004—09: 8-10.

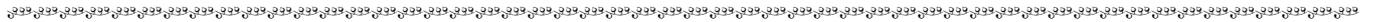
[6] 张光卫, 何锐, 刘禹, 等. 基于云模型的进化算法 [J]. 计算机学报. 2008, 31 (7): 1082-1091.

[7] 戴朝华, 朱云芳, 陈维荣, 等. 云遗传算法及其应用 [J]. 电子学报. 2007, 35 (7): 1419-1424.

[8] 戴朝华, 朱云芳, 陈维荣. 云自适应遗传算法 [J]. 控制理论与应用. 2007, 24 (4): 646-650.

[9] 徐智伟, 张盛兵. SOC 的可测性设计策略 [J]. 计算机测量与控制. 2008, (8): 1095-1098.

[10] 许川佩, 侯红菊. 基于云自适应粒子群算法的 NoC 路径分配研究 [J]. 微电子学与计算机. 2011, 28 (9): 13-16.



(上接第 2486 页)

图 5 中下面的直线是直流桥路信号放大系统信噪比同温度变化的关系曲线, 上面是锁相信号放大系统信噪比同温度变化的关系曲线。总体上, 新的方法在不同的温度条件下都提高了测量的精度。

图 6 更清楚地说明了此种关系, 在 240~330K 的条件下, 新方法比传统方法的信噪比的提升值基本保持在 1 个数量级左右。

实验数据和分析结果表明, 绝对辐射计中使用的前置锁相

放大方法可以有效消除传统绝对辐射测量的直流误差和由于器件温度漂移引起的误差, 并大大降低了随机噪声对系统精度的影响, 很大程度上提高了系统的分辨率和精度。

5 结论

本文介绍一种应用于微型化的新型绝对辐射计的前置锁相放大系统, 大大降低了随机噪声对系统精度的影响, 很大程度上提高了系统的分辨率和精度, 使新型电替代辐射计的绝对定标精度得到很大的提升。

参考文献:

[1] 方伟, 金锡峰. 一种双锥腔补偿型绝对辐射计的研制 [J]. 太阳能学报, 1992, 13 (3): 406-411.

[2] 方伟, 禹秉熙, 姚海顺. 太阳辐照绝对辐射计 (SIAR-1) 与国际比对 [J]. 光学学报, 2003, 23 (1): 112-116.

[3] 王锐, 宋克非. 高精度紫外探测器辐射定标系统 [J]. 光学精密工程, 2009, 17 (3): 469-474.

[4] 赵汉宾, 和卫星, 吕继东, 等. 低功耗高精度体温计设计 [J]. 计算机测量与控制, 2011, 19 (3): 676-678.

[5] 陈佳佳. 微弱信号检测 [M]. 北京: 中央广播电视大学出版社, 1987.

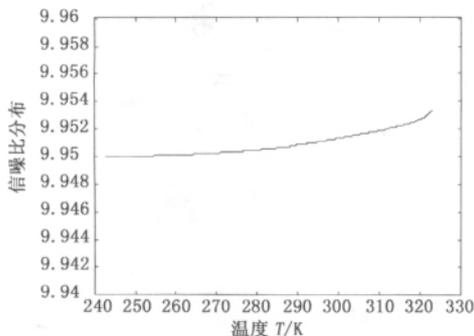


图 6 锁相信号放大系统和直流桥路信号放大系统信噪比比值图