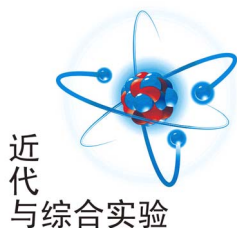


文章编号:1005-4642(2018)12-0001-05



基于数字锁相放大器测量电阻热噪声

贾莲莲^{a,c}, 贺子芸^{a,c}, 曾迪昂^{a,b}, 王自鑫^{a,b}, 蔡志岗^{a,c}

(中山大学 a. 物理学国家级实验教学示范中心;

b. 电子与信息工程学院; c. 物理学院, 广东 广州 510275)

摘 要:数字式锁相放大器利用相干解调的方法对有用信号进行搬移,再结合高 Q 值的窄带低通滤波器对搬移后的信号进行低通滤波,最后得到有用信号的幅值与相位信息. 利用 OE1022 锁相放大器测量了电阻热噪声,使用 LabVIEW 采集电阻热噪声数据,并用 MAD 算法统计处理数据. 实验结果表明:1 kΩ~1 MΩ 的陶瓷电阻的热噪声测量值符合电阻热噪声理论.

关键词:电阻热噪声;锁相放大器;微弱信号;LabVIEW

中图分类号:TN722;TM54

文献标识码:A

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2018.12.001

现在科学研究对测量仪器精度的要求越来越高,但仪器噪声的存在会严重影响仪器检测结果. 仪器噪声主要是指电子器件带来的噪声,其中电阻热噪声的影响很大^[1]. 因此提高测量精度,需要深入研究电阻热噪声. 现有的测量电阻热噪声的理论研究已经比较成熟,比如耶鲁大学的 Leonardo Motta, Benjamin Wilson^[2] 和明尼苏达大学的 Keith Ruddick^[3] 等都成功测量出电阻热噪声的精确值,但这些测量系统相对比较复杂. 锁相放大器^[4]是专用于检测微弱信号的电学仪器,可在强噪声背景下提取微弱信号,且具有抗干扰能力强、大幅提高信号的信噪比、动态范围大、时间稳定性强等特点. 同时锁相放大器具有高集成度、高精度度和操作简单的优势,可代替电阻热噪声测量系统^[2-3]中的放大器和滤波器,简化实验步骤. 本文设计了基于 OE1022^[5-8]数字锁相放大器的电阻热噪声测量实验,使用 LabVIEW 程序采集锁相放大器测量的数据,并进行统计分析,以验证实际测量结果与理论值是否相符.

1 实验原理

1.1 锁相放大器的基本原理

锁相放大技术是基于相干检测方法的微弱信

号检测手段,其核心是相敏检测技术(Phase sensitive detection, PSD). 实验所用 OE1022 型锁相放大器的 PSD 结构框图如图 1 所示,由信号通道 $S_I(t)$ 、参考通道 $S_R(t)$ 、PSD 模块和 LPF 模块构成.

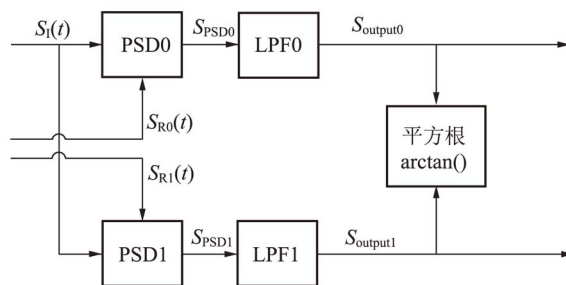


图 1 锁相放大器 OE1022 结构框图

输入待测信号 $S_I(t)$ 可定义为

$$S_I(t) = A_I \sin(\omega t + \varphi) + B(t), \quad (1)$$

其中 A_I 为幅值, ω 为角频率, φ 为相位, $B(t)$ 为总噪声.

2 路参考信号可定义为

$$S_{R0}(t) = A_R \sin(\omega t + \delta), \quad (2)$$

$$S_{R1}(t) = A_R \cos(\omega t + \delta). \quad (3)$$

输入待测信号与参考信号同时进入 PSD 模块进行乘法运算:

“第 10 届全国高等学校物理实验教学研讨会”论文

收稿日期:2018-05-30;修改日期:2018-09-07

基金项目:广州市科技计划项目(No. 201707010422)

作者简介:贾莲莲(1996—),女,河北衡水人,中山大学物理学院 2014 级本科生.

通信作者:蔡志岗(1962—),男,福建厦门人,中山大学物理学院教授,博士,从事光信息技术研究工作.



$$S_0(t) = \frac{1}{2} A_I A_R \cos(\varphi - \delta) - \frac{1}{2} A_I A_R \cos(2\omega t + \varphi + \delta) + B(t) A_R \sin(\omega t + \delta), \quad (4)$$

$$S_1(t) = \frac{1}{2} A_I A_R \sin(\varphi - \delta) + \frac{1}{2} A_I A_R \sin(2\omega t + \varphi + \delta) + B(t) A_R \cos(\omega t + \delta), \quad (5)$$

经过 LPF 滤除工频与二倍频信号,最后得到直流分量为

$$X = S_{\text{output}0} = \frac{1}{2} A_I A_R \cos(\varphi - \delta), \quad (6)$$

$$Y = S_{\text{output}1} = \frac{1}{2} A_I A_R \sin(\varphi - \delta). \quad (7)$$

通过 X 与 Y 的平方根计算可以消除未知量,得到待测信号幅值与相位信息为

$$R = \frac{2 \sqrt{X^2 + Y^2}}{A_R} = A_I, \quad (8)$$

$$\theta = \varphi - \delta = \arctan(Y/X). \quad (9)$$

以上为数字式锁相放大器实现微弱信号检测的理论模型. 简单来说数字式锁相放大器利用相干解调的方法对有用信号进行搬移,再结合高 Q 值的窄带低通滤波器对搬移后的信号进行低通滤波,最后得到有用信号的幅值与相位信息.

1.2 器件噪声的理论知识

一般认为理论预期以外得到的检测结果,或者是对得到准确检测结果有影响的输入,均可被称为噪声. 噪声具有瞬时值不可预知的随机性,但这种随机性也并不是完全的杂乱无章,而是具有一定的统计规律.

电子测量技术领域,常见的噪声来源有 3 种^[9]: 外界环境噪声、电子串扰造成的噪声和仪器本身的噪声. 而仪器本身的噪声又分为 3 类^[10]: 电子器件的热噪声、半导体结的散弹噪声和所有器件均存在的 $1/f$ 噪声. 本文目的是测量电阻热噪声,为排除散弹噪声和 $1/f$ 噪声对电阻热噪声测量的影响,分别对 3 种噪声进行分析,厘清各噪声之间的关系.

1.2.1 热噪声

载流子微观热运动的随机涨落在宏观上的体现可以认为是电阻热噪声的根源^[11],它存在于一切电子系统中,且不因有无电流流过器件而改变. 即使没有连接到任何信号源或电源,器件仍对外表现出噪声电压的起伏. 贝尔实验室 J. B. Johnson 最早于 1928 年发现热噪声,后 Nyquist 证明了热噪声的功率谱密度函数,因此热噪声又被称为约翰逊噪声、奈奎斯特噪声.

电阻热噪声的大小可以用以下理论来计算. 例如,在温度为 T 时,由电阻 R 产生的实际开路噪声电压为

$$V = \sqrt{4kTRB}, \quad (10)$$

其中, k 为玻尔兹曼常量, T 是电阻的绝对温度, R 是电阻的阻值(Ω), B 是带宽(Hz).

Nyquist 利用热力学推理以数学方式描述了热噪声的统计特性,其统计物理模型来自涨落耗散定理,并证明了热噪声功率谱函数为

$$S_i(f) = 4kTR, \quad (11)$$

由式(11)可知,热噪声功率谱密度函数与频率无关,当阻值和温度一定,噪声功率谱密度在整个频域内是常量,这充分体现了热噪声的白噪声性质^[12].

1.2.2 散弹噪声

散弹噪声一般用电流来衡量. 理论上,每秒流过 PN 结的平均载流子数与电流大小成正比. 在任一时间间隔,实际载流子数将会在平均值周围变化,这个变化量就是散弹噪声. 其微观机理在于 PN 结中载流子电子与空穴的随机发射与湮灭导致流过势垒的电流随机涨落.

1918 年 W. Schottky 在研究热阴极电子管中电流流动时提出散弹噪声,并从理论上证明了散弹噪声电流是白噪声,其功率谱密度函数为

$$S_{i1}(f) = 2qI_d, \quad (12)$$

其中, q 为电子元电荷量, $q = 1.6 \times 10^{-19}$ C; I_d 为 PN 结的平均电流,单位 A. 由式(12)可知,与电阻热噪声相似,器件的散弹噪声功率与频率无关,当 PN 结平均电流一定,散弹噪声功率谱密度是恒定值^[13].

1.2.3 $1/f$ 噪声

1925 年 Johnson 在电子管电流的研究中首次发现 $1/f$ 噪声,其主要特点是噪声的功率谱密度正比于 $1/f$,即频率越低, $1/f$ 噪声越严重. 其微观机理在于当 2 种导体接触不理想时,其接触电阻将发生随机涨落,从而引起噪声. 因而 $1/f$ 噪声也被称为接触噪声.

理想电阻没有 $1/f$ 噪声,实际电阻的 $1/f$ 噪声一般是元件加工时的缺陷导致的. 可以通过提

高元件的质量来减少 $1/f$ 噪声。

对 $1/f$ 噪声的研究已有数十年,提出的描述模型众多,但是这些模型基本遵循以下描述,即电流幅度满足高斯分布,功率谱密度正比于频率的倒数^[14],可表示为

$$S_i(f) = \frac{K I_d^2}{f}, \quad (13)$$

其中, I_d 为器件平均电流(A), f 是器件的工作频率(Hz), K 与接触面的接触情况及材料类型、几何形状有关。由式(13)可知,与热噪声和散弹噪声不同, $1/f$ 噪声的功率谱密度与频率成反比。

1.3 电阻热噪声测量原理

实验设计测量电阻热噪声的方法是在锁相放大器的输入接口短接一电阻。若电阻元件是理想的,没有噪声,则锁相放大器测得的应该是其本底噪声。实际情况下锁相放大器的测量值是电阻总噪声和锁相放大器本底噪声的叠加值。

消除锁相放大器本底噪声影响的方法是在仪器的输入接口短接 50Ω 电阻。因为仪器接口处采用的 BNC 连接头的等效阻抗是 50Ω , 在保证阻抗匹配的情况下可测量锁相放大器的本底噪声。实际分析电阻热噪声结果时可以通过噪声叠加原理去除本底噪声的成分。

另外需要考虑电阻的总噪声中其他噪声对电阻热噪声测量的影响。空置的电阻,其主要噪声包括热噪声、散弹噪声和 $1/f$ 噪声。本实验主要关注电阻热噪声,需要排除其他噪声对电阻热噪声的影响。经器件噪声的理论知识分析可知,在特定的实验条件下,散弹噪声和 $1/f$ 噪声可以远小于热噪声,两者对电阻热噪声测量的影响可以忽略。这是因为:

1) 散弹噪声源于 PN 结载流子的发射与湮灭,一般是指每个载流子随机通过 PN 结导致其真实的结电流随平均值上下波动。电阻的物理结构和 PN 结有很大的差别,电阻中导电介质引入的散弹噪声相比热噪声来说可以忽略。

2) $1/f$ 噪声由电阻加工时的缺陷导致,选用高精度的电阻可以减弱 $1/f$ 噪声的影响。另外,文献[15]指出当电阻工作频率在 1 kHz 及以上时, $1/f$ 噪声远远小于热噪声,所以在 1 kHz 频率下测量电阻热噪声时基本可以忽略 $1/f$ 噪声的影响。

为减少其他噪声对电阻热噪声测量的影响,

实验中一方面选择 $1/1000$ 的高精度电阻,另一方面测量频率选择 1 kHz 。同时囿于锁相放大器存在本底噪声,待测电阻的阻值一般需要在 $1 \text{ k}\Omega$ 及以上,避免电阻热噪声值太小而不能与本底噪声区分出来。

1.4 对测量结果的处理

自主编写 LabVIEW 程序采集噪声信号,采样 10^4 个点大概需要 10 min 。

对实验数据进行处理,对应的算法如下:

- 1) 开始测量噪声,每隔特定时间取值;
- 2) 取每个 X_n 值,计算 X_n 的平均值

$$\bar{X}_n = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n}; \quad (14)$$

- 3) 计算方差,

$$D_n = (X_n - \bar{X}_n)^2; \quad (15)$$

- 4) 计算 D_n 的平均值

$$\bar{D}_n = \frac{D_1 + D_2 + \dots + D_n}{n}; \quad (16)$$

- 5) 计算一定带宽^[15]内的总噪声

$$V_{\text{sum}} = \sqrt{\bar{D}_n}. \quad (17)$$

带宽指的是 PSD 后的 LPF 的带宽,根据时间常量和滤波器陡降的设置而发生变化。等效噪声带宽 B_{en} 与陡降 S 和时间常量 τ 的对应关系如表 1 所示。

表 1 等效噪声带宽 B_{en} 与陡降 S 和时间常量 τ 的对应关系表

| $S/(dB \cdot \text{oct}^{-1})$ | B_{en}/Hz | t/s |
|--------------------------------|--------------------|--------------|
| 6 | $1/(4\tau)$ | 5τ |
| 12 | $1/(8\tau)$ | 7τ |
| 18 | $3/(32\tau)$ | 9τ |
| 24 | $5/(64\tau)$ | 10τ |

注: t 为等待时间,是测量数据达到最终稳定数据的 99% 所需的时间。

6) 实验的测量条件为:时间常量为 1 s ,滤波器陡降为 24 dB/oct ,因此 $B_{en} = 5/64 \text{ Hz}$,所以最后的噪声为

$$V = \frac{V_{\text{sum}}}{\sqrt{5/64}} \quad (18)$$

2 实验设计、操作与结果分析

2.1 实验平台搭建

如图 2 所示,教学实验平台由电脑、测试用电

阻器以及锁相放大器 OE1022 构成。其中电脑需要准备 LabVIEW2017 以及 VISA 驱动,并确保与 OE1022 连接正常。



图 2 教学实验平台实物图

使用教学特制电阻器连接头,通过小型 PCB 板连接高阻电阻器与 BNC 接头。实验使用 5 种相同材质、不同阻值(0.05, 1, 10, 100, 1 000 kΩ)的电阻器进行对比实验,通过统计规律测量电阻热噪声,并验证电阻热噪声原理的正确性。

使用 LabVIEW 程序自动控制 OE1022 的测量条件至适合挡位,并且以 100 s^{-1} 的采样速率采集 10^4 个点用于后续的实验数据处理。LabVIEW 程序说明见图 3。



图 3 LabVIEW 程序说明

2.2 实验流程

电阻热噪声实验流程如图 4 所示。

- 1)对 OE1022 进行系统复位;
- 2)在 OE1022 前面板 Signal In 的“A/I”接口短接 50Ω 教学用电阻器;
- 3)用 USB 线连接 OE1022 和电脑,打开电阻热噪声实验的测量程序,点击“连接”按钮并确认 OE1022 与电脑连接成功;
- 4)点击“开始测量”,OE1022 将在 LabVIEW 的控制下自动测量热噪声;
- 5)测量结束后,改变电阻器,重复 2)~4)操

作,直到测完所有电阻器;

6)根据 MAD 算法处理数据,并且进行实验分析。

锁相放大器测量电阻热噪声实验的关键设置:时间常量为 1 s,滤波器陡降 24 dB/oct,动态储备 Low,测量频率 1 kHz。

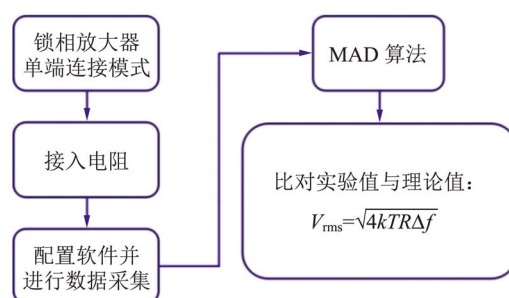


图 4 电阻热噪声实验流程图

2.3 实验结果及分析

$T=300 \text{ K}$ 测量电阻热噪声的结果如表 2 所示。热噪声理论值根据式(10)计算,热噪声测量值根据 1.4 部分的 MAD 算法进行统计处理。由表 2 可以发现锁相放大器的热噪声测试结果在 10% 的误差内与热噪声理论值相符,满足电阻热噪声的规律。

总噪声测量值为本底噪声与热噪声的叠加。其中由于 50Ω 的热噪声理论值很小,因此测量值主要由本底噪声构成。根据噪声叠加的规则^[16],可以计算出本底噪声约为 $5.432 \text{ 20 nV}/\sqrt{\text{Hz}}$ 。根据此本底噪声对其余热噪声测量值进行处理,得到热噪声测量值。

表 2 电阻热噪声实验的测量结果

| R/kΩ | V/(nV · √Hz) | | V _{sum} /(nV · √Hz) | | E _r |
|-------|--------------|----------|------------------------------|---------|----------------|
| | 理论值 | 测量值 | 测量值 | 不确定度 | |
| 0.05 | 0.909 94 | — | 5.507 9 | 0.001 4 | - |
| 1 | 4.069 39 | 4.507 80 | 7.059 0 | 0.001 6 | 10.8% |
| 10 | 12.868 6 | 12.622 1 | 13.741 4 | 0.005 8 | 2.0% |
| 100 | 40.693 9 | 41.389 6 | 41.744 6 | 0.008 8 | 1.7% |
| 1 000 | 128.686 | 137.726 | 137.833 | 0.025 | 7.0% |

3 结束语

在精密仪器测量领域,电阻热噪声影响仪器的本底噪声及测量误差的大小。实验分析了锁相放大器的测量结果的噪声成分,并自建实验平台验证了 1 kΩ~1 MΩ 的陶瓷电阻的热噪声符合电

阻热噪声的理论规律。该实验可以有效地帮助学生进一步了解系统噪声的组成,学习噪声的测量方法。

参考文献:

- [1] 哈佛大学物理实验室. 电子器件噪声分析及测量方法 [EB/OL]. http://users.physics.harvard.edu/~jhoffman/thesis/HoffmanThesis_appVibrations.pdf.
- [2] 耶鲁大学实验室. 约翰逊噪声测量方法[EB/OL]. <http://yalelab.wikidot.com/start>.
- [3] 明尼苏达大学物理实验室. 噪声分析测量方法[EB-OL]. <http://spa-mxpweb.spa.umn.edu/resources/ExpWriteups/LabManNoise.pdf>.
- [4] 中国科学院物理研究所微弱信号检测小组,江西省庐山电子仪器厂. 锁相放大器——一种检测微弱信号的手段[J]. 物理,1977,6(4):206-210.
- [5] 蔡屹. 基于双相锁相放大器的微弱信号矢量测量[J]. 微计算机信息,2007,23(9-1):111-112.
- [6] 朱晓莉,厉霞. 基于 AD630 的双相锁相放大器设计[J]. 机电工程技术,2012,41(6):19-23.
- [7] 中大科仪. OE1022 数字锁相放大器说明书[EB/OL]. http://www.ssi-instrument.com/upload/pdf/OE1022_User_Manual_cn.pdf.
- [8] 陈泽宁,王自鑫,贺子芸,等. 数字锁相放大器中相敏检波检测技术的基本原理实验[J]. 物理实验,2018,38(1):22-28.
- [9] 戴逸松. 低频噪声测量技术的现状及最新进展[J]. 计量学报,1994,15(4):314-319.
- [10] 王署光. 电子元器件低频电噪声测试技术及应用研究[J]. 电子测试,2016(17):134-135.
- [11] 何峥嵘. 运算放大器电路的噪声分析和设计[J]. 微电子学,2006,36(2):148-153.
- [12] 王力,施芸城,杨忠杰,等. 基于 LabVIEW 的锁相放大器的设计与测量[J]. 物理实验,2015,35(9):33-36.
- [13] 郑磊. 电子元器件散粒噪声特性及测试方法研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2009.
- [14] 高晋占. 微弱信号检测[M]. 北京:清华大学出版社,2004:47-48.
- [15] 赵良省. 噪声与振动控制技术[M]. 北京:化学工业出版社,2004:22-24.
- [16] 卢屹,张新军,张嘉俊,等. 数字锁相环的参数设计及其应用[J]. 通信技术,2001(9):12-14.

Measuring the resistance thermal noise based on digital lock-in amplifier

JIA Lian-lian^{a,c}, HE Zi-yun^{a,c}, ZENG Di-ang^{a,b},
WANG Zi-xin^{a,b}, CAI Zhi-gang^{a,c}

(a. National Level Experiment Teaching Center for Physics;

b. School of Electronics and Information Technology; c. School of Physics,
Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: The coherent demodulation method was used to shift the useful signal of the digital phase-locked amplifier, and then the narrow-band low-pass filter with high Q value was used to carry out the low-pass filtering of the shifted signal, finally the amplitude and phase information of the useful signal were obtained. The lock-in amplifier, OE1022, was used to carry out the measurement of resistance thermal noise. The noise was collected with LabVIEW, and then MAD algorithm was used for statistical data processing. The experimental results showed that the thermal noise of ceramic resistor of $1\text{ k}\Omega \sim 1\text{ M}\Omega$ was in accordance with the theory of resistance thermal noise.

Key words: resistance thermal noise; lock-in amplifier; weak signal; LabVIEW

[责任编辑:任德香]