

基于虚拟仪器的频率计权实现方法

李茂林 江 剑

(南京理工大学机械工程学院 南京 210094)

摘 要:传统的频率计权方法是通过搭建硬件滤波网络来实现的,其测试精度很容易受到电子元件带来的不确定因素的影响。为了克服传统频率计权方法中硬件电路的繁琐和测试精度的不稳定,文中提出了一种在虚拟仪器平台上实现频率计权的方法,详细阐述了通过FFT分析来实现频率计权的原理和方法,并给出了对应的程序框图。通过输入模拟信号的方式分别对A计权和C计权的测量效果进行验证,实验结果表明A计权和C计权的测量精度都达到了1级声级计检定标准。文中提出的频率计权方法简单灵活,既能简化硬件电路,又能满足测试精度的要求。

关键词:虚拟仪器;频率计权;FFT

中图分类号: TN06 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.40

Frequency weighting method based on virtual instrument

Li Maolin Jiang Jian

(Department of Technology of Measurement and Instrument, School of Mechanical Engineering,
Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: The traditional method of frequency weighting is realized by building up the hardware filter network, and the test accuracy is easily affected by the uncertainty of electronic components. In order to overcome the disadvantages of traditional method, such as complicated hardware and instable test, this paper proposes a method to achieve frequency weighting on the virtual instrument platform, describing the principles and methods of achieving the frequency weighting by the FFT analysis in detail and providing the corresponding block diagram. The measurement results of A and C weighting are verified by the way of inputting analog signals. The experimental results show that the measurement accuracy of the A and C weighting have reached the testing standards of the first class level of sound level meters. The proposed method is simple and flexible, and it can simplify the hardware circuit and satisfy the requirement of the test precision.

Keywords: virtual instrument; frequency weighting; FFT

1 引 言

为了模拟人耳对不同频段声音的敏感程度,声学上使用频率计权的方法来模拟人耳感官^[1]。目前常用的频率计权方法是采用模拟器件设计高阶阻容滤波网络,这种计权方法的电路结构比较复杂、难于调试,且较难保证测试的稳定性和可靠性。

本文基于虚拟仪器平台配合集成元件^[2],利用快速傅里叶分析方法^[3],提出了一种新型、快捷、稳定的频率计权方法,并模拟噪声信号进行实验,验证了该种频率计权方法的有效性和可靠性。

2 频率计权原理

通过FFT分析实现频率计权,首先对离散的时域信号进行傅里叶变换,然后对信号的每个频率成分进行频率加权^[4],将频率加权后的频域信号进行逆傅里叶变换,可以得到瞬时声级。根据帕斯瓦尔定理,可以通过频域信号的平均能量来得出信号的声级。

声级计中的A计权和C计权及相应的允差是以1/3倍频程的中心频率点给出的^[5]。其他频率点的计权值可以根据IEC 61672中给出的频率计权的计算公式求出。

A 计权各频率点的计权值可由(1)式计算得到,修约到 0.1 dB:

$$A(f) = 20\lg \left[\frac{f_4^2 f_1^4}{(f^2 + f_1^2)(f^2 + f_2^2)^+ (f^2 + f_3^2)^+ (f^2 + f_4^2)} \right] - C_{1000} \quad (1)$$

C 计权各频率点的计权值可由(2)式计算得到,修约到 0.1 dB:

$$C(f) = 20\lg \left[\frac{f_4^2 f_2^2}{(f^2 + f_1^2)(f^2 + f_4^2)} \right] - C_{1000} \quad (2)$$

式中: f 为输入信号的频率; $f_1 = 20.6$ Hz; $f_2 = 107.7$ Hz; $f_3 = 737.9$ Hz; $f_4 = 12\,194.0$ Hz; $A_{1000} = -2.000$ dB; $C_{1000} = -0.062$ dB。

由式(1)和式(2)可得 A 计权系数 $\alpha_A(f)$ 和 C 计权系数 $\alpha_C(f)$ 分别为:

$$\alpha_A(f) = \frac{f_4^2 f_1^4}{(f^2 + f_1^2)(f^2 + f_2^2)^+ (f^2 + f_3^2)^+ (f^2 + f_4^2)} \quad (3)$$

$$\alpha_C(f) = \frac{f_4^2 f_2^2}{(f^2 + f_1^2)(f^2 + f_4^2)} \quad (4)$$

对信号进行采样,设采样频率为 f_s 满足采样定理,采样点数为 N ,得到离散时域信号 $x(n)$,求取 $x(n)$ 对应的傅里叶变换为:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{nk} \quad (k = 0, 1, \dots, N-1) \quad (5)$$

式(5)中 $W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$

FFT 结果中的频率分辨率 Δf 和每个点对应的频率 f_k 由式(6)给出,其中 $k=0, 1, \dots, N-1$ 。

$$\Delta f = \frac{f_s}{N}; f_k = k\Delta f \quad (6)$$

根据式(3)、(5)、(6)可得频域上的 A 计权系数修正结果为:

$$X_A(k) = \alpha_A(f_k)X(k) \quad (7)$$

由帕斯瓦尔定理可知,信号无论是在时域还是频域,信号的总能量是守恒的,即:

$$\sum_{n=0}^{N-1} |x(n)|^2 = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} |X(k)|^2 \quad (8)$$

结合式(7)和式(8)可得信号 A 计权修正后的平均能量为:

$$\hat{P} = \sqrt{\frac{1}{N^2} \sum_{k=1}^{N-1} |X_A(k)|^2} \quad (9)$$

结合式(9)和声级计算公式可得 A 计权声级为:

$$L_A = 20\lg \left(\frac{\hat{P}}{2 \times 10^{-5}} \right) + 2 \quad (10)$$

对信号进行采集相当于对原始信号进行截断,当采样频率和信号频率不同步时会引起频谱泄漏,则需要通过加窗的方法来抑制频谱泄漏^[6]。常用的窗函数及其特性如表 1 所示。

表 1 常用窗函数及其特性/dB

窗函数	主瓣宽度	旁瓣峰值 /dB	旁瓣衰减速度 (dB/oct)
矩形窗	$4\pi/N$	-13	-2
Blackman	$12\pi/N$	-57	-18
Hanning	$8\pi/N$	-31	-6
Hamming	$8\pi/N$	-41	-2

在选择窗函数时要综合考虑如何获取最大信息和减小旁瓣的影响^[7],即选择的窗函数的主瓣宽度尽量要窄,从而可以保持最大信息,而旁瓣的衰减速度尽量要快,从而可以减小旁瓣的影响。

分析以上窗函数及其特性可以得到:矩形窗主瓣宽度较窄,旁瓣很高,虽然可以有效获取主瓣的频率,但同时也会使频率分辨率降低;Blackman 窗虽然幅值识别精度高,但是频率分辨率很低;汉宁(Hanning)窗主瓣宽度是矩形窗的两倍,对主瓣频率识别精度有所降低,但波动和泄漏都明显减少,因而汉宁窗常用于测试频谱分量较为复杂的信号;海明(Hamming)窗相对于汉宁窗旁瓣的峰值有所减小,但是其衰减速度比汉宁窗慢了不少。由于声音信号的频率成分非常复杂,因而本文选择采用汉宁窗对采样信号进行预处理,从而可以减小频谱泄漏。

3 频率计权程序

3.1 求取单边 FFT 的模

对离散的采样信号进行傅里叶变换求出对应的频域结果和相位数据^[8]。由于在 LabVIEW 中的 FFT 为实数 FFT,得到的结果具有对称性,即为双边 FFT^[9]。因而要将双边 FFT 转换为单边 FFT,并求取单边 FFT 结果对应的模 $|X'(k)|$ 。程序如图 1 所示。

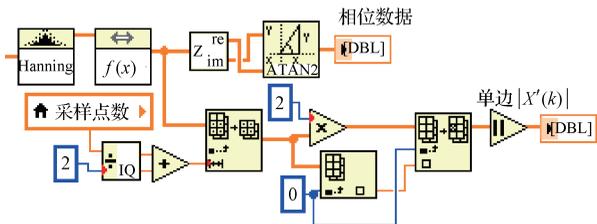


图 1 求取单边 FFT 的模

3.2 对频域模加权

对频域模加权的程序如图 2 所示。

在求取单边 FFT 模后,根据计权类型的选择来对单边频域模 $|X'(k)|$ 进行频率加权,并根据帕斯瓦尔定理分别求取计权后的声级和未计权的声级,而后将两者相减,求出计权衰减量。

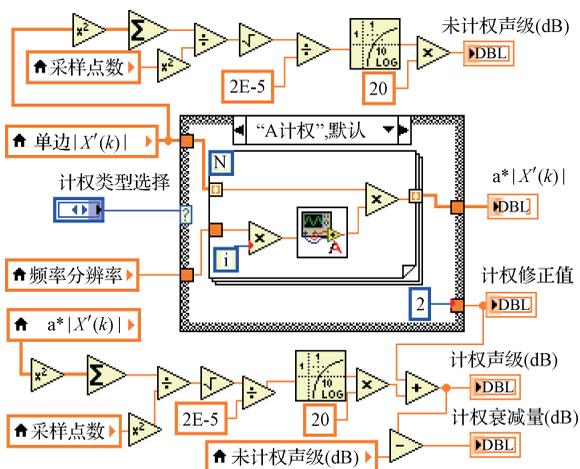


图2 对频域模加权

3.3 求取计权瞬时声级

在对频域信号的模完成频率加权后,结合相位数据求出加权后双边频域结果,再通过逆傅里叶变换求取计权瞬时声级^[10]。程序如图3所示。

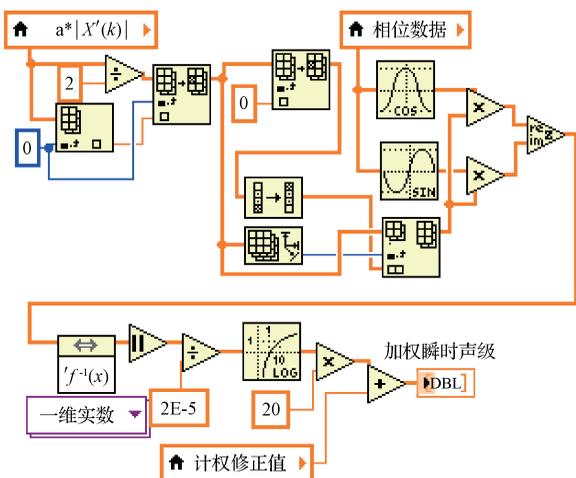
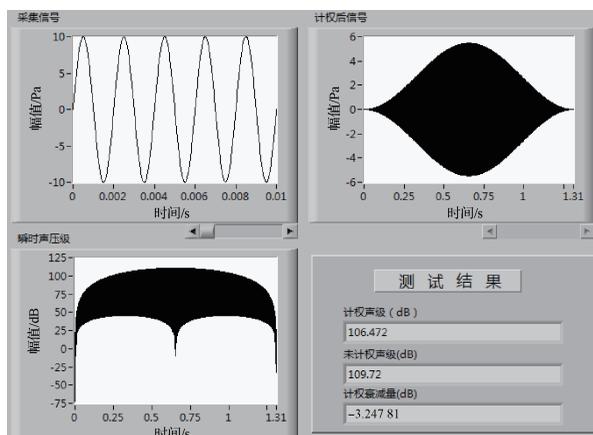


图3 求取计权瞬时声级

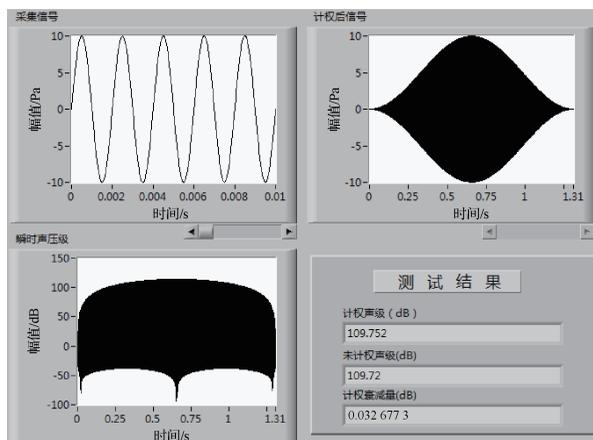
4 实验测试及分析

以频率为500 Hz,振幅为10 Pa,初相位为0的正弦波信号作为声压输入信号^[11],采样频率取50 KHz,采样点数为65 536,分别采用A计权和C计权进行测试,得到实验结果如图4(a)、(b)所示。图4中采集信号为实际输入的声压时域信号,计权后信号为计权后的声压时域信号。为了显示直观,采集信号只截取前0.01 s进行显示。

将图4中实验结果的计权衰减量修约到0.1 dB可得:A计权对信号的衰减为-3.2 dB,C计权对信号的衰



(a) A计权实验结果



(b) C计权实验结果

图4 频率计权实验结果

减为0.0 dB。

根据国家规定的频率计权检定标准,对同一采样信号分别进行A计权和C计权测量^[12],采样频率为50 kHz,采用时间计权S档,对应的采样点数为65 536,信号频率为20 Hz到20 kHz,选取1/3倍频程的中心频率点进行测试。实验结果如表2和表3所示。

由表2和表3可以看出,A计权和C计权的测量精度都达到1级声级计检定标准。采用时间计权为F档进行测量,取采样点数为8 192,结果表明,A计权和C计权的测量精度也都达到了1级声级计检定标准。虽然传统的频率计权方法运用硬件滤波电路也能达到1级声级计的检定标准,但增加了硬件设计的负担并且电路中电阻电容和运放都会受到外界诸如温度变化、湿度变化等条件的影响,这都影响着频率计权的稳定性和可靠性。而本文提出的频率计权实现方法完美地规避了这一问题,同时又满足了测试精度的要求。

表2 A计权声级测量实验结果

标准 频率/Hz	A 频率 计权/dB	A 频率计权 实验结果/dB	1 级声级 计允差/dB
20	-50.5	-50.4	±2.5
25	-44.7	-44.9	+2.5; -2.0
31.5	-39.4	-39.6	±2.0
40	-34.6	-34.6	±1.5
50	-30.2	-30.3	±1.5
63	-26.2	-26.3	±1.5
80	-22.5	-22.5	±1.5
100	-19.1	-19.2	±1.5
125	-16.1	-16.2	±1.5
160	-13.4	-13.3	±1.5
200	-10.9	-10.9	±1.5
250	-8.6	-8.7	±1.4
315	-6.6	-6.7	±1.4
400	-4.8	-4.8	±1.4
500	-3.2	-3.2	±1.4
630	-1.9	-2.0	±1.4
800	-0.8	-0.9	±1.4
1 000	0.0	-0.1	±1.1
1 250	+0.6	+0.5	±1.4
1 600	+1.0	+0.9	±1.5
2 000	+1.2	+1.1	±1.6
2 500	+1.3	+1.2	±1.6
3 150	+1.2	+1.1	±1.6
4 000	+1.0	+0.9	±1.6
5 000	+0.5	+0.5	±2.1
6 300	-0.1	-0.2	+2.1; -2.6
8 000	-1.1	-1.2	+2.1; -3.1
10 000	-2.5	-2.5	+2.6; -3.6
12 500	-4.3	-4.3	+3.0; -6.0
16 000	-6.6	-6.8	+3.5; -17.0
20 000	-9.3	-9.4	+4.0; -∞

表3 C计权声级测量实验结果

标准 频率/Hz	C 频率 计权/dB	C 频率计权 实验结果/dB	1 级声级 计允差/dB
20	-6.2	-6.3	±2.5
25	-4.4	-4.5	+2.5; -2.0
31.5	-3.0	-3.1	±2.0
40	-2.0	-2.0	±1.5
50	-1.3	-1.4	±1.5
63	-0.8	-0.9	±1.5
80	-0.5	-0.6	±1.5
100	-0.3	-0.4	±1.5
125	-0.2	-0.2	±1.5
160	-0.1	-0.1	±1.5
200	0.0	-0.1	±1.5
250	0.0	-0.1	±1.4
315	0.0	0.0	±1.4
400	0.0	0.0	±1.4
500	0.0	0.0	±1.4
630	0.0	0.0	±1.4
800	0.0	0.0	±1.4
1 000	0.0	-0.1	±1.1
1 250	0.0	-0.1	±1.4
1 600	-0.1	-0.1	±1.5
2 000	-0.2	-0.2	±1.6
2 500	-0.3	-0.4	±1.6
3 150	-0.5	-0.6	±1.6
4 000	-0.8	-0.9	±1.6
5 000	-1.3	-1.3	±2.1
6 300	-2.0	-2.1	+2.1; -2.6
8 000	-3.0	-3.1	+2.1; -3.1
10 000	-4.4	-4.5	+2.6; -3.6
12 500	-6.2	-6.2	+3.0; -6.0
16 000	-8.6	-8.7	+3.5; -17.0
20 000	-11.2	-11.3	+4.0; -∞

5 结论

本文针对基于硬件电路实现频率计权方法的不足,提出了一种基于虚拟仪器的频率计权实现方法。给出了频率计权的分析过程、LabVIEW 程序和实验测试,结果表明,该频率计权方法能达到国家检定标准的 1 级声级计要求。在本设计中采用加 Hanning 窗的方法抑制信号截断带来的频谱泄漏,提高了测量的可靠性。

参考文献

- [1] 唐求,贾杨威,滕召胜,等. 基于粒子群优化的声级计 A 计权设计[J]. 仪器仪表学报,2015,36(4):856-862.
- [2] WEN X L, PENG C R, FANG D M, et al. High-stability electrostatic field micro sensor for sounding thunderstorm applications[J]. Instrumentation, 2014, 1(3): 58-66.
- [3] 刘正琼,胡丽莉,唐璇,等. 基于虚拟仪器的肢体姿态检测系统研究[J]. 电子测量与仪器学报,2015,29(6):907-913.
- [4] 金晖,何洁. 频率计权的全数字实现[J]. 仪器仪表学报,2006,27(6):1495-1499.
- [5] 赵丹,李丽,贺慧勇,等. 频率计权网络的数字电路实现[J]. 现代电子技术,2015(19):94-97,101.

(上接第 26 页)

参考文献

- [1] 王鹏. 2015-2016 中国集成电路产业发展蓝皮书[M]. 北京:人民出版社,2016:92-100.
- [2] 孙金诚. 两岸 IC 产业合作台湾需要开放[N]. 人民政协报,2015(11):1-2
- [3] 冯秀英. 北京 40 亿元建中关村集成电路设计园[J]. 京津冀周刊,2016(6):1
- [4] 陈平. 中国集成电路产业发展机遇分析[J]. 集成电路应用,2016(3):11-13.
- [5] Leo. 中国 IC 产业发展之路自主研发加产业与资本结合[J]. 集成电路应用,2015(10):12-14
- [6] 杨迪娜. 全球集成电路产业整合与嵌入式系统发

- [6] 凌菁. 基于 Hanning 窗插值 FFT 的频率计权频谱分析方法[J]. 中国仪器仪表,2014(9):72-76.
- [7] 刘祥楼,刘昭廷,姜继玉,等. 基于虚拟仪器技术的高精度拟合人耳听觉特性 A 计权算法[J]. 自动化与仪器仪表,2016(3):200-201,204.
- [8] 罗自荣,陈章位,蔡德威,等. 基于嵌入式系统的频率计权实现方法分析与对比[J]. 振动与冲击,2014(9): 21-26.
- [9] 吕富勇,周瑞卿,阮世阳,等. 基于虚拟仪器的空间磁场分布检测装置设计[J]. 电子测量技术,2015,38(11):79-84.
- [10] 罗长更,曹广忠. 基于 LabVIEW 的多功能声级计设计[J]. 仪表技术与传感器,2007(6):16-18.
- [11] 张黎,蔡亮. 基于 LabVIEW 的虚拟信号发生器的设计与实现[J]. 国外电子测量技术,2014,33(1): 82-85.
- [12] 钟波,孙庆生,王雪晶,等. 声级计频率计权特性自动检定系统研究与实现[J]. 电声技术,2010(5):37-40.

作者简介

李茂林,男,1991 年出生,山东青岛人,南京理工大学在读工学硕士,主要研究方向为测试计量。
E-mail:lml199105@163.com

展[J]. 单片机与嵌入式系统应用,2016(2):2.

- [7] 马国琴. 中国集成电路产业国际竞争力研究[R]. 上海大学,2013(1):21-25.
- [8] 张晗,罗勇. 台湾的系统芯片“国家型”科技计划[J]. 海峡科技与产业,2014(1):81-84.
- [9] 叶甜春. 智能化趋势下集成电路产业发展机遇[J]. 集成电路应用,2016(5):18-20.

作者简介

潘卓伟,男,1979 年,山东潍坊,本科,北京市电子技术情报研究所产业研究室副主任。主要研究方向为电子信息产业发展及企业竞争情报研究。
E-mail:Pan_zw123@126.com