

一种改进的超低失真度测量方法

张 威 张正娴

(上海精密计量测试研究所 上海 201109)

摘要: 介绍了基波抑制法和频谱分析法测量失真度的原理,讨论了这两种方法测量超低失真度的局限性。提出了一种超低失真度测量方法,在信号进入频谱仪前先用基波抑制器对基波进行衰减,使信号满足频谱分析仪的动态范围,根据基波抑制器的基波抑制量和各次剩余谐波的失真电平,使用推导的公式计算得到失真度,并对测量结果进行了验证,该方法综合了基波抑制法和频谱分析法的优点,能有效降低失真度测量中测量范围的下限,可以达到 -130 dB,提高了测量的准确度。

关键词: 基波抑制法;频谱分析法;超低失真度测量

中图分类号: TN98 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.1020

Improved method on super-low distortion measurement

Zhang Wei Zhang Zhengxian

(Shanghai Precision Metrology & Test Research Institute, Shanghai 201109, China)

Abstract: Introduce the fundamental suppression method and spectrum analysis method for distortion measurement. Discuss the limitation of the two methods for super-low distortion measurement. Propose an improved method for Super-low distortion measurement, using the fundamental suppressor attenuate fundamental before signal enters the spectrum analyzer to satisfy the dynamic range. According to the fundamental suppression and each harmonic residual amount of distortion level, use the derived formula to calculate the distortion and validate the measurement results. This method combines the advantages of fundamental suppression method and spectral analysis method, can effectively reduce the lower limit of measurement range to -130 dB and improve the accuracy of measurement.

Keywords: fundamental suppression method; spectrum analysis method; super-low distortion measurement

0 引言

在无线电参数中,非线性失真是一个非常重要的参数。目前测量失真度的仪器根据测量原理大致可分为两大类:基波抑制法和频谱分析法^[1]。基波抑制法测量失真度时,由于失真度仪基波抑制深度和机内引入失真的影响,限制了失真度仪的测量下限,通常只能达到 $-60 \sim -80$ dB^[2]。频谱分析法测量失真度时,由于频谱分析仪自身失真度及动态范围的限制,测量下限通常只达到 $-70 \sim -80$ dB^[3]。因此这两种方法均不能用于超低失真度的测量。本文提出一种改进的超低失真度测量方法,即基波抑制+频谱分析法。该方法综合基波抑制法和频谱分析法的优点,可以有效降低超低失真度测量的下限到 -130 dB。

1 失真度的基本概念

1.1 失真度的定义

失真度是表征一个信号偏离纯正弦信号的程度。当

基波幅度一定时,谐波幅度大,则失真度大,谐波幅度小,则失真度小,是一个无量纲的量。一个失真的正弦信号,根据傅里叶级数分析,是由基波和谐波组合而成。因此失真度的定义为全部谐波能量与基波能量之比的平方根值,即:

$$K = \sqrt{\frac{P - P_1}{P_1}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} P_n}{P_1}}$$

式中: P 为信号总能量; P_1 为信号基波能量; P_n 为信号第 n 次谐波的功率,单位均为W。

当负载是纯电阻负载时,也可以用全部谐波电压(电流)的有效值与基波电压(电流)的有效值之比的百分数来表示,即:

$$K = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2}}{U_1} \times 100\%$$

式中: U_1 为信号基波电压有效值; U_n 为信号第 n 次谐波电压的有效值,单位为V。

1.2 超低失真度测量

1.2.1 基波抑制法测量超低失真度

一般的模拟失真度测量仪是按照基波抑制法的原理设计和制造的,通过具有频率选择性的无源网络(如:谐振电桥、文氏电桥、T型电桥等)抑制基波,由总的电压有效值和抑制基波后的谐波电压有效值计算出失真度^[2]。广泛应用于无线电测量领域中的非线性失真度的测量。但是由于基波抑制法不能单独测出基波电压的有效值,因此基波抑制法测量得到的失真度 K_x 有别于失真度定义值 K ,换算公式如下:

$$K_x = \frac{K}{\sqrt{1+K^2}}$$

K 越小, K_x 与 K 值差别越小,在测量小失真度信号时, $K \approx K_x$ 。

使用基波抑制法测量正弦信号失真度时,基波残余失真和失真度仪机内引入失真是影响测量准确度的主要影响量。基波残余失真是指失真仪中基波抑制器电路自身分布参数的影响及电路的损耗,造成实际的基波抑制特性变差,达不到理想的情况,即基波抑制深度不够,测量失真时有基波残余分量,其频率和基波频率一致^[4]。

失真度仪机内引入失真是由于失真仪的输入级、桥前放大器以及有源滤波器中有源器件的非线性,即使精心挑选也不可能完全消除,由此产生的失真称为机内引入失真,其频率和谐波频率一致。这两种影响量严重影响超低失真的测量准确度。且测量小失真信号时,两种误差不容易分开^[4]。

由于基波抑制深度的限制和失真度仪机内引入的失真,在很大程度上限制了失真度测量的下限。理想的基波抑制器应完全滤除基波,又不衰减任何其他频率。但实际上的基波抑制器对基波衰减抑制只能达到 $-60 \sim -80$ dB,对谐波损耗 $0.5 \sim 1$ dB^[5]。并且,随着频率的升高,基波抑制能力下降。所以,因基波抑制器的抑制深度不够而存在的基波剩余电压、失真仪电路本身的固有噪声及所引入的非线性失真等限制了失真仪所能测试信号失真的下限值,通常只能达 -60 dB。对使用了高 Q 值或多级基波抑制器的新式失真仪,基波抑制衰减可达到 $-80 \sim -100$ dB,测试下限可达 -80 dB。因此通用失真仪及同类仪器一般只能测试 -80 dB 以上的失真度,频率范围为 $2 \sim 200$ kHz。

1.2.2 频谱分析法测量超低失真度

频谱分析法是使用频谱分析仪,测出被测信号基波和各次谐波分量的大小,按照失真度定义的公式计算出被测信号的失真度。频谱分析法测量失真度的下限受测量设备自身的失真度及动态范围的限制,若采用动态范围为 80 dB 的频谱分析仪,则可以测到的最小失真度为 0.01% (-80 dB)。使用频谱分析法测量失真度时,其频率的测量范围很宽。但频谱仪的噪声电平、内部失真、灵敏度大小和最大输入电平指标综合影响着频谱分析仪的谐波动态范

围,限制了频谱分析仪能以规定的精度测量加在输入端的正弦信号基波与各次谐波电平的最大差值^[6]。一般的频谱分析仪测量失真度的下限最低也就达到 $-70 \sim -80$ dB。

近年来,由于微处理技术的高速发展和应用,音频分析信号的技术指标也明显提高,国产精密低失真源,其信号输出失真度已小于 -90 dB (5 Hz ~ 20 kHz),国外的音频分析仪如 R&S 公司 UPV,在 20 Hz ~ 80 kHz 频率内正弦信号失真度典型值已小于 -110 dB,对于这样低的失真指标,以上两种测量方法已经不适用了^[7]。因此探索一种切实可行,且易于推广应用的超低失真度的测量和评估方法,是失真度参数测量中的一个重点。

2 基波抑制+频谱分析法测量超低失真度的可行性分析

频谱分析仪在进行信号分析时,能直观的显示信号基波及各次谐波的能量,便于用户了解信号详细信息。但是受限于谐波动态范围,不能用于超低失真度的测量。在实际应用中一个失真电平为 -100 dB 的正弦信号,使用 Agilent N9000 A 频谱分析仪测量总失真时,测量结果为 -75 dB,与实际失真电平差别特别大,已经严重影响了测量准确度。因此考虑在信号接入频谱分析仪前,先把正弦信号的基波分量衰减几十分贝,即在正弦信号进入频谱分析仪前,加一级基波抑制网络,而让谐波信号无衰减的通过^[8]。这样经过基波衰减的正弦信号完全可以适应频谱分析仪的谐波动态范围。综合基波抑制网络的基波抑制量和频谱分析仪测得的剩余失真电平,即可计算得出原正弦信号的失真度。

在实际应用中,使用失真度仪的基波抑制器作为基波抑制网络,同时使用一台频率测量下限比较小的频谱分析仪测量经过基波抑制后的谐波信号。设被测正弦信号的基波功率为 P_1 ,第 n 次谐波信号功率为 P_n ($n=2,3,\dots$),经过抑制量为 C 的基波抑制网络后的基波功率为 P_{1s} ,谐波功率为 P_{ns} ($n=2,3,\dots$),则被测正弦信号的第 n 次谐波失真电平 D_n 为:

$$D_n(\text{dB}) = 20\lg \sqrt{\frac{P_n}{P_1}} = 10\lg \frac{P_n}{P_1} = 10\lg \frac{P_n \cdot P_{1s}}{P_{1s} \cdot P_1} = 10\lg \frac{P_n}{P_{1s}} + 10\lg \frac{P_{1s}}{P_1}$$

假设基波抑制网络只抑制基波,谐波信号可以无影响的通过,即 $P_{ns} = P_n$,则上式可以表示为:

$$D_n = 10\lg \frac{P_{ns}}{P_{1s}} + 10\lg \frac{P_{1s}}{P_1}$$

即: $D_n(\text{dB}) = D_{ns} + C$ (1)

其中: $D_{ns} = 10\lg \frac{P_{ns}}{P_{1s}}$,称为被测正弦信号经过基波抑制网络后的第 n 次谐波剩余失真电平。 $C = 10\lg \frac{P_{1s}}{P_1}$,称为失真度仪的基波抑制器对基波的抑制量。则被测正弦信号

的总失真电平 D 可以表示为:

$$D(\text{dB}) = 20\lg K = 10\lg \frac{P_2 + P_3 + \dots}{P_1} = 10\lg(10^{\frac{D_2}{10}} + 10^{\frac{D_3}{10}} + \dots) \quad (2)$$

若选用性能较好的失真度测量仪,即不考虑失真度仪机内失真对测量带来的影响^[9]。基波抑制+频谱分析法可测失真度的下限值为:失真仪的基波抑制量(-60~-80 dB)+频谱仪最大谐波动态范围(-70~-80 dB)=(-130~-160 dB),若使用高 Q 值基波抑制器的失真度测

量仪,则测量下限可达-150~-180 dB,这是失真度仪或其它任何同类仪器所不能及的。因此基波抑制+频谱分析法测量超低失真度是完全可行的,关键在于如何确定失真度仪的基波抑制量 C 以及如何用频谱分析仪测量各次剩余谐波失真电平 D_{ns} 。

3 改进后的超低失真度测量方法

基波抑制+频谱分析法测量超低失真度原理框图如图 1 所示。

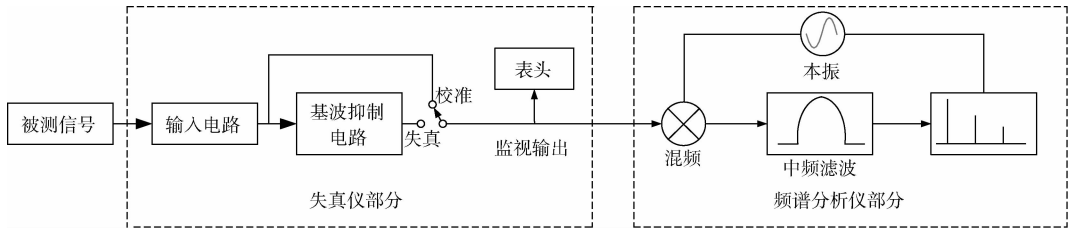


图 1 超低失真度测量原理

3.1 失真度测量仪基波抑制量 C

在图 1 中,首先使失真度测量仪工作在校准状态,调整失真度测量仪的校准电位器,使失真度测量仪的表头指示满刻度,这时使用频谱分析仪测量被测正弦信号的基波功率电平为 P_1 (dBm)。然后调整开关使失真度测量仪工作在失真状态,对被测正弦信号进行失真度测量。当失真度测量仪工作在最佳调谐状态时,即失真度测量仪的基波抑制器对正弦信号达到最佳抑制状态时,使用频谱分析仪测量此时的剩余基波功率电平 P_{1s} (dBm)。则此时失真度测量仪的基波抑制量为:

$$C(\text{dB}) = P_{1s} - P_1 + C_s \quad (3)$$

式中: C_s 为失真度测量仪对基波达到最佳抑制状态时指针所处的量程。

3.2 谐波剩余失真电平 D_{ns}

当失真度测量仪工作在失真状态,基波抑制器对基波达到最佳抑制状态时,若忽略失真度测量仪机内引入的失真,基波抑制器的输出信号包含了剩余基波和各次谐波信号,该信号由失真度测量仪的监视输出至频谱分析仪,由频谱分析仪直观的显示剩余基波以及各次谐波信号的功率强度^[10]。在实际测量中,各次谐波能量主要集中在二次及三次谐波处,其余谐波分量可忽略。即使用频谱分析仪测量出此时剩余基波功率电平 P_{1s} (dBm)、第 n 次谐波功率电平 P_{ns} (dBm),则第 n 次剩余谐波失真电平 D_{ns} 可表示为:

$$D_{ns}(\text{dB}) = P_{ns} - P_{1s} \quad (4)$$

将式(3)、(4)代入式(1),即可得到被测正弦信号的第 n 次谐波失真电平 D_n 为:

$$D_n(\text{dB}) = D_{ns} + C = (P_{ns} - P_{1s}) + (P_{1s} - P_1 + C_s) = P_{ns} - P_1 + C_s \quad (5)$$

由式(5)可以看出,使用基波抑制+频谱分析法测量超低失真度时,只需要用频谱分析仪测量失真度测量仪工作在失真状态时各次谐波功率 P_{ns} ,失真度测量仪工作在校准状态时基波信号功率 P_1 ,失真度测量仪对基波达到最佳抑制状态时指针所处的量程 C_s ,即可得出被测正弦信号第 n 次谐波失真电平 D_n ,再把式(5)代入式(2),即可计算出被测正弦信号总失真电平 D 。

4 测量不确定度评定

本实验室使用音频分析仪 MAK-6581 失真度测量部分的基波抑制器,同时使用频谱分析仪 FSW 做谐波分析。被测对象为音频分析仪 UPV 的信号发生部分。

4.1 测量重复性引入的不确定度分量

使用改进后的超低失真度测量方法,测量音频分析仪 UPV 的信号发生部分(10 Hz~80 kHz),取一次测量值作为测量结果。在相同条件下短时间内连续测量 10 次,同时计算实验标准偏差。相关数据如表 1。分析后的不确定度和上级计量机构测量结果和不确定度也在表 1 给出。

由表 1 可知标准偏差的最大值为 0.33 dB。则取: $u_A = 0.33 \text{ dB}$

4.2 失真度测量仪和频谱分析仪引入的不确定度分量

基波抑制+频谱分析法测量超低失真度的主要误差来源有三个:

- 1) 失真度测量仪的电压测量误差 $e_1: \pm 0.3 \text{ dB}$;
- 2) 频谱分析仪的幅度平坦度误差 $e_2: 9 \text{ kHz}$ 以下: $\pm 1.0 \text{ dB}$; 9 kHz 以上: $\pm 0.45 \text{ dB}$ 。
- 3) 频谱分析仪对数刻度相对幅度误差 $e_3: \pm 0.5 \text{ dB}$

表 1 测量数据

频率/kHz	测量均值/dB	标准偏差/dB	不确定度/dB	技术指标/dB	上级计量 机构测量值/dB	上级计量机构 不确定度/dB
0.02	-113.31	0.33	1.2	<-110	-110.1	5.0
0.1	-114.60	0.23	1.2	<-110	-111.3	5.0
1	-115.31	0.11	1.2	<-110	-112.0	5.0
9	-107.80	0.23	1.2	<-105	-105.6	5.0
20	-96.72	0.17	0.9	<-88	-90.5	5.0
80	-89.61	0.31	0.9	<-80	-81.7	5.0

设该测量方法的不确定度近似服从正态分布, $k = 2.58$ (置信概率 $P = 99\%$), 按照公式:

$$u_B = \frac{\sqrt{e_1^2 + e_2^2 + e_3^2}}{k}$$

则 u_B 的值为 0.45 dB (9 kHz 以下)、0.29 dB (9 kHz 以上)。

4.3 合成标准不确定度

按照公式:

$$u_C = \sqrt{u_A^2 + u_B^2}$$

则 u_C 的值为 0.56 dB (9 kHz 以下)、0.44 dB (9 kHz 以上)。

4.4 扩展不确定度

按照公式: $U = k \times u_C$

取 $k = 2$, 则基波抑制 + 频谱分析法测量超低失真度的扩展不确定度约为 1.2 dB (9 kHz 以下)、0.9 dB (9 kHz 以上)。

5 数据验证

按照传递比较法, 进行数据验证。既分别使用本文提出的改进的超低失真度测量方法和上级计量技术机构的标准装置分别测量同一台被测仪器。取表 1 中的测量平均值作为本方法的测量数据。在采用传递比较法进行验证时, 将测量结果转化为百分比表示, 测量不确定度转化为百分比表示, 数据如表 2 所示。

表 2 数据验证

频率/kHz	测量均值 $y_0/\%$	不确定度 $U_1/\%$	上级计量机构 测量值 $y_1/\%$	上级计量机构 不确定度 $U_2/\%$	$\frac{ y_0 - y_1 }{y_1} / \%$	$\sqrt{U_1^2 + U_2^2} / \%$
0.02	0.000 216	15	0.000 313	77	31.0	78
0.1	0.000 186	15	0.000 272	77	31.6	78
1	0.000 172	15	0.000 251	77	31.5	78
9	0.000 407	15	0.000 525	77	22.5	78
20	0.001 46	11	0.002 99	77	51.2	77
80	0.003 31	11	0.008 22	77	59.7	77

由表 2 可知 $\frac{|y_0 - y_1|}{y_1} < \sqrt{U_1^2 + U_2^2}$, 验证结果满意。

6 结 论

本文提出的基波抑制 + 频谱分析法测量超低失真度的方法, 与传统的失真度测量方法相比, 能有效降低失真度测量的下限到 -130 dB, 解决了各种新型音频分析信号产生部分及超低失真源失真度无法计量的问题。可为各计量技术机构及研发单位提供一种测量超低失真度的技术解决方案, 应用前景广泛。

参考文献

- [1] 付珍. 浅谈失真度计量[J]. 计量与测试技术, 2016, 43(9): 83-84.
- [2] 朗宾, 韩国栋, 黄天辰. 一种基于 HHT 的失真度测试

方法[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(1): 37-38.

- [3] 傅中君, 周根元, 陈鉴富. 基于准同步 DFT 的非整数谐波分析算法[J]. 仪器仪表学报, 2011, 30(12): 235-236.
- [4] 胡朝炜. 数据采集设备的失真度测试方法研究[J]. 电子测量技术, 2009, 32(1): 137-139.
- [5] 李炳荣. 失真度测量方案设计与实施[J]. 安徽工程科技学院学报, 2006, 21(4): 39-40.
- [6] 朗宾, 韩国栋, 濮霞. 基于 HHT 算法的虚拟失真度测试仪设计[J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(1): 72-73.
- [7] 樊尚春, 陶泽辉. 非晶/超微晶合金电子变压器谐波失真实验研究[J]. 仪器仪表学报, 2011, 32(5): 1054-1055.

(下转第 159 页)