

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902829

# 基于预失真算法的任意波形发生器校准的研究\*

朱江淼<sup>1</sup> 乔孟元<sup>1</sup> 赵科佳<sup>2</sup> 马培香<sup>1</sup> 高秀娜<sup>1</sup>

(1. 北京工业大学 信息学部 北京 100124; 2. 中国计量科学研究院 北京 100013)

**摘要:**任意波发生器由于其可编程生成任意信号的特性,是信号与系统研究中的常用理想信号源,对其进行可溯源的校准是非常重要的。构建了由任意波形发生器、电缆、转接头、数字示波器和计算机组成的校准系统,采用预失真算法实现了对任意波发生器的可溯源校准。预失真校准方法是基于补偿的思想,首先加载一个仿真的理想信号到任意波形发生器,由示波器进行可溯源测量,测量的信号包含了任意波形发生器和传输器件的失真,这个失真可以通过测量信号与理想信号的差值计算出来,根据这个失真对加载到任意波发生器的理想信号进行调整,最终实现了任意波发生器的可溯源校准,使输入到示波器的信号成为一个理想信号。这是一个迭代过程,设计了迭代结束条件,即直至接近数字示波器的测量精度为止。为了验证校准方法的有效性,将50个等幅恒相的正弦波叠加而成的合成信号加载至任意波形发生器,经3次迭代,其相对误差的最大值从10.408 9%减小到2.305 3%。这表明研究的校准方法是有效的,校准后的任意波形发生器信号源系统可作为一个标准信号源,用于测量仪表的校准。

**关键词:**预失真;多频正弦信号;校准;任意波形发生器

**中图分类号:** TB973 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 410.55

## Research on calibration of arbitrary waveform generator based on predistortion algorithm

Zhu Jiangmiao<sup>1</sup> Qiao Mengyuan<sup>1</sup> Zhao Kejia<sup>2</sup> Ma Peixiang<sup>1</sup> Gao Xiuna<sup>1</sup>

(1. Faculty of Information Technology, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China;

2. National Institute of Metrology of China, Beijing 100013, China)

**Abstract:** Because of the characteristic of generating any signal programmatically, the arbitrary waveform generator is an ideal signal source in the study of signal and system, so it is very important to traceable calibration. In this paper, a calibration system consisting of arbitrary waveform generator, cable, adapter and digital oscilloscope is constructed. The traceable calibration of arbitrary waveform generator is realized by using predistortion algorithm. The predistortion calibration method is based on the idea of compensation. Firstly, a simulated ideal signal is loaded to arbitrary waveform generator, which can be traced by oscilloscope. The measured signal contains the distortion of arbitrary waveform generator and transmission device. This distortion can be calculated by the difference between the measured signal and the ideal signal. According to this distortion, the ideal signal loaded to arbitrary waveform generator is adjusted, and finally it is realized that the traceable calibration of arbitrary waveform generator, and makes the signal input to oscilloscope become an ideal signal. In practice, this is an iterative process. In this paper, the condition of the end of the iteration is designed, that is, until it is close to the measurement accuracy of the digital oscilloscope. In order to verify the validity of the calibration method, this paper loads 50 sine waves of equal amplitude and constant phase into arbitrary waveform generator. After three iterations, the maximum relative error is reduced from 10.408 9% to 2.305 3%. This shows that the calibration method studied in this paper is effective. After calibration, the signal source system of arbitrary waveform generator can be used as a standard signal source for the calibration of measuring instruments.

**Keywords:** predistortion; multi-frequency sinusoidal signal; calibration; relative error

收稿日期:2019-12-13 Received Date: 2019-12-13

\* 基金项目: 三网融合中的视频计量标准与溯源技术研究(2014BAK02B03)、国家市场监督管理总局能力建设项目(ANL1817)资助

## 0 引言

目前,信号产生和信号分析并列为测试技术和电子系统的两大核心,而信号产生直接决定测试技术及电子装备的水平。在信息化和电子化的时代,信号源的种类多种多样,任意波形发生器基于其强大的功能,在众多信号源中脱颖而出,在通信、雷达、医疗、导航、宇航等领域中广泛应用,主要用于各类接收机、系统及部件、元器件的测试。但是任意波形发生器的数模转换器(DAC)以及一些模拟器件的频响不理想,会造成任意波形发生器输出信号的波形失真。这些失真会增添信号传输部分和信号处理部分的难度,并且影响测试结果的精确度,因此对任意波形发生器的失真进行修正是必要的。目前,主要通过芯片设计、内嵌 FIR 校正滤波器、DSP 芯片编程运算等措施对任意波形发生器进行校准,这样做不仅成本高,而且硬件设备本身的计量也是一个难题<sup>[1-2]</sup>;仪器厂商通常用频谱分析仪、矢量信号分析仪等,在“源”和“表”之间相互校准,但因为脉冲参数基准建立在宽带取样示波器上,故频谱仪的溯源还有待研究<sup>[3]</sup>。因此本文研究使用示波器对任意波形发生器进行时域校准,可将任意波形发生器溯源到我国的国家脉冲参数基准上,且溯源链路清晰。

在使用任意波形发生器时,需要用电缆、转接头等将信号传输到测量仪表,电缆和转接头会使信号损耗、衰减,造成线性失真,这些失真也需要进行校准。传统方法是对任意波形发生器、电缆或转接头造成的失真进行单独的估计,然后在测量结果中分别把这些误差去除,该方法需要设计多个实验来完成仪器或器件的系统响应估计,操作和实现过程比较复杂<sup>[4-6]</sup>。而在本文的校准系统中,将任意波形发生器、电缆、转接头等器件视为一个任意波形发生器系统,如图 1 所示。然后借鉴预失真的补偿思想,实现了对任意波形发生器系统的失真校准。

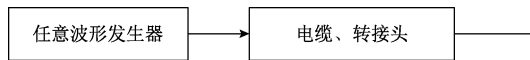


图 1 任意波形发生器系统

Fig. 1 Arbitrary waveform generator system

预失真是源于解决功率放大器线性化一门技术,它的基本思想是在功率放大器的前端引入与其幅频和相频特性相反的系统,用以补偿功率放大器引起的非线性失真。功放预失真的方法有查询表预失真法和多项式预失真法。国内学者大多将预失真应用于功率放大器的补偿,并做了大量研究<sup>[7-8]</sup>;美国 NIST 则基于预失真的补偿思想,研究了一种精密的毫米波调制信号源,并用误差向量幅度(EVM)进行了评价<sup>[9-11]</sup>。本文借鉴了上述研究中

预失真的思想,利用示波器实现了任意波形发生器系统的可溯源校准,该方法能够溯源到我国的国家脉冲参数基准上。其基本思想是任意波形发生器的波形产生机构和传输路径的不理想,导致传输到示波器输入端的波形发生失真,将该失真波形与理想波形的差值作为修正值加载到任意波形发生器,将这一过程迭代,直至满足迭代结束条件。

校准后的任意波形发生器系统可以作为一个标准信号源,用于校准通信信号、雷达信号和导航信号的接收机,频谱仪,矢量信号分析仪等仪器;而且该信号源系统降低了信号传输和信号处理的难度;提高了测试结果的准确度;国内首次实现了量值统一,将任意波形发生器溯源到示波器上,进而溯源到国家脉冲参数基准上。

## 1 校准系统的建立

如图 2 所示,校准系统由任意波形发生器、电缆、转接头、数字示波器计算机组成,是一个可溯源的系统,这是因为数字示波器可以溯源至宽带取样示波器,进而溯源到我国的脉冲国家参数基准上<sup>[12-14]</sup>。本文将数字示波器视为一个精准的测量仪表,因此数字示波器显示的测量信号即等于任意波形发生器系统的输出信号。然后基于预失真思想对任意波形发生器系统中的仪器或器件造成的失真进行补偿,即每次测量后,首先估计任意波形发生器系统的幅频响应,然后根据该幅频响应确定测量信号与理想信号的差值;然后根据该差值调整加载到任意波形发生器的信号,用以补偿任意波形发生器系统的失真。

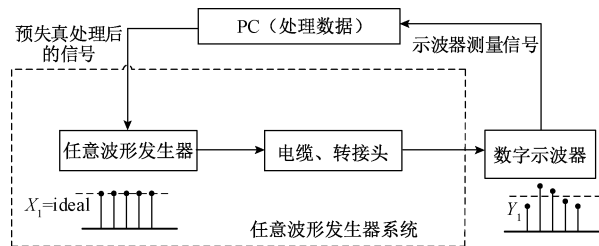


图 2 校准系统框图

Fig. 2 Block diagram of calibration system

在校准过程中,通过仪器的 SCPI 接口,可以控制任意波形发生器和数字示波器,即上位机(PC)对任意波形发生器和数字示波器的波形数据进行加载和读取。首先将仿真的理想波形加载至任意波形发生器中,其次通过 PC 读取数字示波器显示的测量数据,然后在 PC 端的数据处理软件中求出测量系统的频率响应,以确定下次要加载到任意波形发生器的信号。预失真是一个迭代的过程,需要不断地重复上述步骤。

## 2 预失真算法

为了解决任意波形发生器系统的失真问题,本文使用预失真算法对系统中的仪器或传输部件造成的失真进行补偿。如图 2 所示,加载到任意波形发生器的信号的频域式  $X_1(f)$  和数字示波器上显示信号的频域式  $Y_1(f)$  有偏差,这是因为测量系统的频率响应理论上应为  $H(f) = 1$ ,但是由于存在失真而导致测量系统的频率响应不等于理论值  $H(f)$ 。预失真算法一个迭代的过程,其步骤如下。

1) 将仿真的  $x_1(t)$  加载到任意波形发生器,读取数字示波器显示的测量信号  $y_1(t)$ ,其傅里叶变换分别为  $X_1(f)$  和  $Y_1(f)$ ,估计出本次测量的系统函数,如式(1)所示。

$$H_1(f) = Y_1(f)/X_1(f) \quad (1)$$

2) 确定第 2 次要加载到任意波形发生器中的数据。想让数字示波器显示测量信号等于理想信号  $X_1(f)$ ,则必须调整加载到任意波形发生器中的信号  $X_2(f)$ ,调整后上传到任意波形发生器中的信号  $X_2(f)$  如式(2)所示。

$$X_2(f) = X_1(f)/H_1(f) = X_1^2(f)/Y_1(f) \quad (2)$$

3) 估计第 2 次测量的系统函数。将  $X_2(f)$  加载到任意波形发生器中,读取数字示波器此次显示的测量信号  $y_2(t)$ ,估计第 2 次测量的系统函数  $H_2(f)$ ,如式(3)所示。

$$H_2(f) = \frac{Y_2(f)}{X_2(f)} = \frac{Y_2(f)Y_1(f)}{X_1^2(f)} \quad (3)$$

4) 继续重复上述步骤,估计第 3 次要加载到任意波形发生器的信号。不难得到要上传到任意波形发生器中的信号,如式(4)所示。

$$X_3(f) = \frac{X_1(f)}{H_2(f)} = \frac{X_1^3(f)}{Y_2(f)Y_1(f)} \quad (4)$$

类似地,第  $n$  次测量的系统函数的估计如式(5)所示。

$$H_n(f) = \frac{Y_n(f)}{X_n(f)} = \frac{Y_n(f)Y_{n-1}(f)\cdots Y_1(f)}{X_1^n(f)} \quad (5)$$

式中:  $X_n(f)$  指的是第  $n$  次加载到 AWG 的信号;  $Y_n(f)$  指的数字示波器第  $n$  次测量的信号。对于第  $(n+1)$  次要加载到任意波形发生器中的信号如式(6)所示。

$$X_{n+1}(f) = \frac{X_1(f)}{H_n(f)} = \frac{X_1^{n+1}(f)}{Y_n(f)Y_{n-1}(f)\cdots Y_1(f)} \quad (6)$$

由上述分析不难看出,若相邻两次预失真后的测量信号与理想信号的频谱的幅值差的相对最大值小于等于设定的值时,即满足式(7),结束加载,完成失真补偿。预失真算法的流程图如图 3 所示。

$$\left( \frac{|Y_{n+1}(f) - X_1(f)|}{X_1(f)} \right)_{\max} \leq TH \quad (7)$$

式中:  $TH$  表示设定的误差阈值。

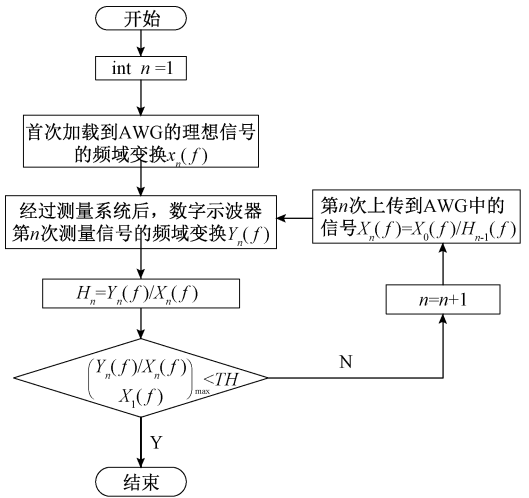


图 3 预失真算法流程

Fig. 3 Flow chart of pre-distortion algorithm

## 3 实验验证

由于多频正弦信号的幅度和相位易于控制,且在频域易于观察<sup>[15]</sup>,因此本文采用仿真的多频正弦信号作为理想信号加载至任意波形发生器,其表达式如式(8)所示。

$$x(t) = \sum_{k=1}^N A_k \cos(2\pi f_k t + \varphi_k) \quad (8)$$

式中:  $N$  为正弦波的个数;  $A_k$  为第  $k$  个正弦波的幅度;  $f_k$  为第  $k$  个正弦波的频率;  $\varphi_k$  为第  $k$  个正弦波的初相位。

参照图 1 的测量方案,准确连接测量仪器设备。将仿真的 50-tone 的多频正弦信号加载到 33 250 A 的任意波形发生器,被测信号接入 DPO5000 数字示波器的通道 1,并在数字示波器上设置触发方式和触发频率。对于 50-tone 的多频正弦信号,设置数字示波器的采样率为 1 MSym/s 采样时间为 5 ms,采样点数为 5 000。实际仪器连接如图 4 所示。

本文用数字示波器显示的测量信号和理想信号频谱幅值差的相对误差最大值来对预失真的效果进行评价,因为相对误差表示了测量信号与理想信号的接近程度。在进行预失真处理时,需要计算测量系统的幅频响应,根据该响应确定测量信号与理想信号的差值,然后根据该差值调整下次要加载到任意波形发生器的数据。重复预失真的过程,直至接近数字示波器的测量精度为止。

实验中仿真的 50-tone 的多频正弦信号是一个周期信号,其频谱是幅值相等的 50 根谱线谱线,如图 5 空心

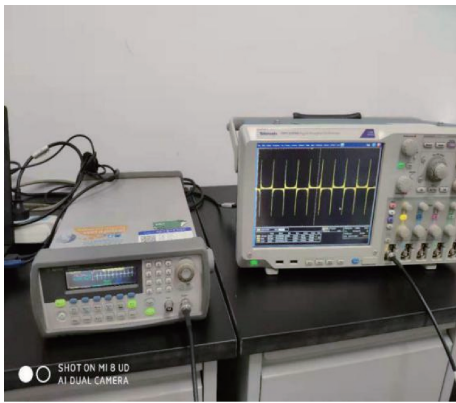


图4 实验测量图

Fig. 4 Picture of Experimental measurements

圆圈所示。实验时,对多频正弦信号进行4次测量,3次预失真处理。50-tone 的多频正弦信号的绝对误差的最大值由 0.001 降到 0.000 230 53 V,其相对误差的最大值由 10.408 9%降到 2.305 3%,几乎接近于理想信号。具体如表 1 所示。

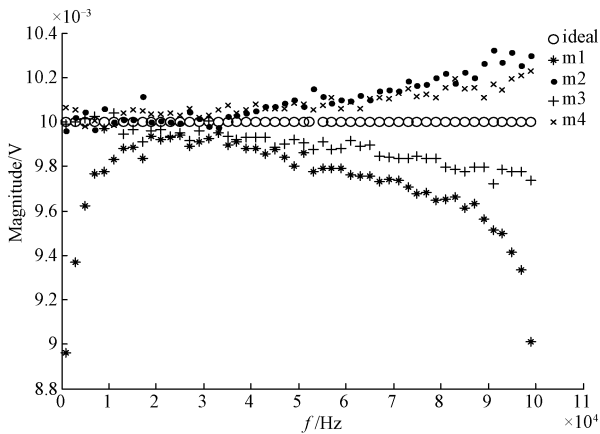


图5 50-tone 合成信号的预失真处理后的频谱图

Fig. 5 Spectrogram of 50-tone signal after pre-distortion processing

表 1 预失真处理后测量信号与理想信号的合成信号的绝对误差和相对误差的最大值

Table 1 Maximum absolute error and relative error of all sinusoidal waves between 50-tone measured signal and ideal signal after predistortion processing

多频正弦信号	第 1 次测量	第 2 次测量	第 3 次测量	第 4 次测量
绝对误差最大 大值/V	0.001	0.000 321 35	0.000 276 01	0.000 230 53
相对误差最大 大值/%	10.408 9	3.213 4	2.760 1	2.305 3

由表 1 可知,多频正弦信号的相对误差的最大值从

10.408 9%减少至 2.305 3%,更加接近于理想信号,表明了预失真方法的有效性。为了更直观的看出仿真的效果,将仿真的理想信号和每次预失真处理后的测量信号进行快速傅里叶变换(FFT),如图 5 所示。其中 ideal 表示理想信号,m1、m2、m3、m4 分别表示第 1 次、第 2 次、第 3 次和第 4 次测量的信号。图 5 是 50-tone 多频正弦信号经过每次预失真处理后的频谱图。

由图 5 可知,随着迭代次数的增加,数字示波器测得的波形数据逐渐接近于仿真的理想波形数据,但是始终在理想波形的上下浮动。这是因为在实验中,数字示波器和任意波形发生器自己产生的误差及输出的精度对测量结果产生的影响。通常,预失真的迭代次数为 3~4 次。本人也曾尝试迭代更多的次数,但误差在一个范围内保持不变。通过这个实验可知,本文提出的预失真算法能有效的对任意波形发生器的失真进行校准。

## 4 结 论

本文研究了一个基于数字示波器的可溯源的任意波形发生器校准系统,用预失真算法对任意波形发生器系统的失真进行修正,经修正后的任意波形发生器系统将输出一个理想信号,用以校准其他的测量仪器。实验的结果表明,本文提出的预失真算法能有效的对任意波形发生器系统的失真进行修正,并且可以溯源到我国的脉冲国家参数基准上,但是对测量结果的不确定度分析尚未研究。

## 参考文献

[ 1 ] 明小燕. PXI 任意波形发生器补偿及校准技术研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2009.  
MING X Y. Research on compensation and calibration technology of PXI arbitrary waveform generator [ D ]. Harbin: Harbin University of technology, 2009.

[ 2 ] 武长春. 任意波形发生器幅频校正方法研究及模块设计[D]. 成都:电子科技大学,2010.  
WU CH CH. Amplitude frequency correction method research and module design of arbitrary waveform generator [ D ]. Chengdu: University of Electronic Science and technology, 2010.

[ 3 ] 滕友伟. 一种任意波形发生器幅度校准数据的调用方法[J]. 电子质量,2016(8):71-73.  
TENG Y W. A call method for amplitude calibration data of arbitrary waveform generator [ J ]. Electronic quality, 2016 ( 8 ) : 71-73.

[ 4 ] 张喜洋,曹芸,邱新宇,等. 分析转接头在微波功率校准中的影响[J]. 计量技术,2014(12):58-62.  
ZHANG X Y, CAO Y, QIU X Y, et al. Analysis of the influence of adapter on microwave power calibration [ J ].

- Measurement Technology, 2014 (12): 58-62.
- [ 5 ] 卢峰,刘明亮,郁月华. 带有连接电缆的“NTN”校准技术[J]. 计量学报,2005(1):66-69.  
LU F, LIU M L, YU Y H. NTN calibration technology with connecting cable [ J ]. Journal of metrology, 2005 (01): 66-69.
- [ 6 ] ZINGARELLI M, GREGO R. 去除杆天线电场测量中同轴电缆的耦合效应[J]. 安全与电磁兼容,2016(2): 89-91.  
ZINGARELLI M, GREGO R. Remove the coupling effect of coaxial cable in electric field measurement of rod antenna [ J ]. Safety and electromagnetic compatibility, 2016 (2): 89-91.
- [ 7 ] 陈龙,陈文华. 基于 R&S 信号源与频谱仪的宽带数字预失真算法研究[J]. 中国集成电路,2018,27(11): 26-29.  
CHEN L, CHEN W H. Wideband digital predistortion algorithm validation based on R&S SMW200A and FSW43 [ J ]. China Integrated Circuit, 2018, 27 (11): 26-29.
- [ 8 ] 赵霞,李瞻宁. 一种新的基于反馈的数字预失真器模型[J]. 北京邮电大学学报,2017,40(5):75-81.  
ZHAO X, LI ZH N. A new feedback based on digital predistorter model [ J ]. Journal of Beijing University of Posts and telecommunications, 2017, 40 (5): 75-81.
- [ 9 ] REMLEY K A, WILLIAMS D F, HALE P D, et al. Millimeter-wave modulated-signal and error-vector-magnitude measurement with uncertainty [ J ]. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 2015, 63(5): 1710-1720.
- [ 10 ] REMLEY K A, WILLIAMS D F, HALE P D. Calibrated oscilloscope measurements for system-level characterization of weakly nonlinear sources [ C ]. Proc. INMMiC, 2014: 1-4.
- [ 11 ] REMLEY K A, HALE P D, WILLIAMS D F. A precision millimeter-wave modulated-signal source [ C ]. IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT), 2013: 1-3.
- [ 12 ] 朱江森,王世鏢,缪京元,等. 宽带取样示波器时基漂移的不确定度研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2018, 2018, 32(3):184-188.  
ZHU J M, WANG S B, MIAO J Y, et al. Research on uncertainty of time base drift of broadband sampling oscilloscope [ J ]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2018,2018, 32(3):184-188.
- [ 13 ] ZHU J M, ZHAO L X. Research on the uncertainty of calibrated bandwidth of broadband sampling oscilloscope [ C ]. ICEMI, 2017: 299-306.
- [ 14 ] 朱江森,李然,缪京元,等. 高速取样示波器时基失真数学模型的研究与仿真[J]. 北京工业大学学报, 2013,39(12):1810-1814.  
ZHU J M, LI R, MIAO J Y, et al. Research and Simulation of time base distortion mathematical model of high speed sampling oscilloscope [ J ]. Journal of Beijing University of Technology, 2013, 39 (12): 1810-1814.
- [ 15 ] BORGES CARVALHO N, REMLEY K A, SCHREURS D, et al. Multisine signals for wireless system test and design [ J ]. IEEE Microwave Magazine, 2008, 9 (3): 122-138.

### 作者简介



朱江森,北京工业大学副教授,硕士生导师,主要研究方向为数字信号处理,现代测量,时域测量和数字去卷积应用。

E-mail: zhujiangmiao@bjut.edu.cn

**Zhu Jiangmiao** is currently working as an associate professor and M. Sc. supervisor at Beijing University of Technology. Her current research interests include digital signal processing, modern measurement, time domain measurement.



乔孟元,现为北京工业大学硕士研究生,主要研究方向为数字调制信号处理、示波器校准。

E-mail: 1098639281@qq.com

**Qiao Mengyuan** is a M. Sc. candidate at Beijing University of Technology. Her main research interests are digital modulated signal processing and Oscilloscope calibration.



赵科佳,中国计量科学研究院的研究员,主要研究方向包括数字调制信号处理、现代测量、脉冲参数和时域测量等。

**Zhao Kejia** currently work as an associate researcher in the National Institute of Metrology. His main research interests include digital signal processing, modern measurement, pulse parameter, and time domain measurement.