

信号发生器校准不确定度的分析与评定

段海珍 丁 圣

中航西安飞机工业集团股份有限公司 陕西 西安 710089

摘要: 信号发生器是广泛应用于科研与生产中的一种通用电子设备,对信号发生器校准过程中测量不确定度的分析与评定,为信号发生器提供准确可靠的量值,保障信号发生器在科研生产中的正确作用,同时为建立计量最高标准以及实验室的测试校准工作提供参考依据。

关键词: 校准; 不确定度; 信号发生器; 测量重复性

引言: 信号发生器在科研与生产中得到了广泛的应用,信号发生器的各项技术指标是否准确直接影响到科研研究结果与生产产品质量,因此必须定期对信号发生器进行校准,以确保其提供的输出准确可靠,而校准结果的不确定度是判断校准结果准确性的一个重要依据,因此对信号发生器校准不确定度的分析与评定工作尤为重要,给出完整合理的校准不确定度的测量结果对科研与生产工作结果正确与否起到决定性的作用。

1 概述

校准信号发生器的测量依据是JJF1931-2021《信号发生器》校准规范,校准过程所需要使用的标准装置主要由测量接收机、频率计、驯服铷原子频率标准等设备组成。

2 校准不确定度评定

校准不确定度是根据所用到的信息,表征赋予被测量值分散性的非负参数,一般由若干分量组成,有测量所得的测得值只是被测量的估计值,测量过程中的随机效应及系统效应均会导致测量不确定度,评定校准不确定度首先要考虑影响不确定度的来源,在校准过程中所有可能影响到校准结果的因素如测量仪器、测量环境、测量人员、测量方法等方面全面考虑,以保证不确定度分量的全面覆盖,应尽量做到不遗漏、不重复。

信号发生器的校准的主要项目有频率、功率、载波剩余调频、载波剩余调幅、谐波、调幅深度、调频频偏、调相相偏、调制解调失真、幅度调制下的伴随调频、频率调制下的伴随调幅等,以下分别对各个校准项目进行详细的不确定度分析与评定。

2.1 频率校准不确定度的分析与评定

如图1所示,信号发生器输出频率的校准是使用频率计(接入参考频标:铷原子频率标准10MHz晶振)直接测量被校信号发生器输出信号的频率。

校准信号发生器输出频率的不确定度来源主要有:测量重复性、内部晶振(铷原子频标)及读数分辨力等。

a 晶振引入的不确定度 u_1

由上级检定证书,铷原子频标频率准确度为 5×10^{-10} ,则 $a = 5 \times 10^{-10}$,当测量250kHz时,最大允许误差为 $1.25 \times 10^{-4} \text{Hz}$,服从按均匀分布,取 $k = \sqrt{3}$,则: $u_1 = \frac{a}{k} = 7.2 \times 10^{-5} \text{Hz}$

当测量40GHz时,最大允许误差为20Hz,服从按均匀分布,取 $k = \sqrt{3}$,则: $u_1 = \frac{a}{k} = 11.5 \text{Hz}$

b 测量重复性引入的不确定度 u_2

在相同条件下,使用该标准对信号发生器在250kHz进行测量,得到其重复性

$s(x) = 7 \times 10^{-5} \text{Hz}$,则:

$$u_2 = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = 3 \times 10^{-5} \text{Hz}$$

在相同条件下,使用该标准对信号发生器在40GHz进行测量,得到其重复性

$s(x) = 2.4 \text{Hz}$,则:

$$u_2 = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = 0.76 \text{Hz}$$

c 读数分辨力引入的不确定度 u_3

该频率计分辨力为12位,测250kHz时,分辨力为 $1 \times 10^{-6} \text{Hz}$,服从均匀分布,取 $k = \sqrt{3}$,则:

$$u_3 = \frac{a}{k} = \frac{1 \times 10^{-6}}{\sqrt{3}} \text{Hz} = 0.29 \times 10^{-6} \text{Hz}$$

该频率计分辨力为12位,测40GHz时,分辨力为0.1Hz,服从均匀分布,取 $k = \sqrt{3}$,则:

$$u_3 = \frac{a}{k} = \frac{0.1}{\sqrt{3}} \text{Hz} = 0.029 \text{Hz}$$

d 合成标准不确定度

读数分辨力引入的不确定度和测量重复性引入的不确定度比较,取其大者,则:

测量250kHz时, $u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 8 \times 10^{-5} \text{Hz}$

测量40GHz时, $u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 12\text{Hz}$

由上可知, 被校信号发生器示值重复性引入的不确定度分量在其不确定度评定中不占主导地位, 所以不再考虑改变测量频率点引起的示值重复性不确定度分量。

2.2 功率校准不确定度的分析与评定

如图1所示, 信号发生器的功率校准是使用测量接收机直接测量被校信号发生器输出信号的功率。

2.2.1 0dBm测量不确定度评定

使用FSMR测量接收机测量射频功率的不确定度来源主要有: 测量重复性、失配、校准因子、射频功率的测量准确度、功率指示器的读数分辨力、零点调节误差、零点漂移误差和噪声误差等^[1]。

a 功率敏感器校准因子引入的不确定度:

功率敏感器校准因子由校准证书给出, 可根据上级证书,

NRP-Z37功率敏感器: $a = 2.0\% \sim 3.5\%$, $k = 2$

$$u_1 = \frac{a}{k} = 1.0\% \sim 1.75\%$$

换算成对数形式 $u_1 = 0.044\text{dB} \sim 0.076\text{dB}$

NRP-Z55功率敏感器: $a = 2.0\% \sim 4\%$, $k = 2$

$$a = 2 \times \frac{1.12-1}{1.12+1} \times \frac{1.4-1}{1.4+1} = 0.019, a = 2 \times \frac{1.27-1}{1.27+1} \times \frac{1.4-1}{1.4+1} = 0.040, u_4 = \frac{a}{k} = 0.014 \sim 0.028,$$

转换为对数形式, $u_4 = 0.06\text{dB} \sim 0.12\text{dB}$

$$a = 2 \times \frac{1.12-1}{1.12+1} \times \frac{1.4-1}{1.4+1} = 0.019, a = 2 \times \frac{1.16-1}{1.16+1} \times \frac{1.4-1}{1.4+1} = 0.024, u_4 = \frac{a}{k} = 0.014 \sim 0.017,$$

转换为对数形式, $u_4 = 0.06\text{dB} \sim 0.08\text{dB}$

e 量重复性引入的不确定度:

在相同条件下, 使用该标准对信号发生器输出功率进行测量, 得到其重复性

0dBm (250kHz) 时 $s(x) = 0.0012\text{dB}$; 0dBm (40GHz)

时 $s(x) = 0.0010\text{dB}$ 则:

$$0 \text{ dBm} (250\text{kHz}) \text{ 时}, u_5 = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = 0.0004\text{dB}$$

$$0 \text{ dBm} (40\text{GHz}) \text{ 时}, u_5 = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = 0.0004\text{dB}$$

2.2.2 相对测量时功率校准不确定度的分析与评定

FSMR测量接收机测量射频功率的不确定度来源主要有线性、失配、测量重复性、分辨力、量程转换、标准测量不准确等^[2]。

a 线性引入的不确定度:

由说明书知, 线性误差为: $\pm 0.01\text{dB} \pm 0.005\text{dB}/10\text{dB}$,

0 dB~90 dB: $a = (0.01 \sim 0.045) \text{dB}$, 取 $k = \sqrt{3}$, 则:

$$u_1 = \frac{a}{k} = (0.0058 \sim 0.026) \text{dB}$$

$$u_1 = \frac{a}{k} = 1.0\% \sim 2.0\%$$

换算成对数形式 $u_1 = 0.044\text{dB} \sim 0.086\text{dB}$

b 线性误差引入的不确定度:

由说明书知, 线性误差为: $\pm 0.01\text{dB} \pm 0.005\text{dB}/0\text{dB}$,

取 $k = \sqrt{3}$, 则:

$$u_2 = \frac{a}{k} = 0.006\text{dB} \sim 0.012\text{dB}$$

c 分辨力引入的不确定度:

测量射频功率时, 分辨力为 0.001dB , 服从均匀分布, 取 $k = \sqrt{3}$, 则:

$$u_3 = \frac{a}{k} = \frac{0.001}{\sqrt{3}} \text{dB} = 0.00029\text{dB}$$

d 失配引入的不确定度:

由校准证书得: NRP-Z37功率敏感器驻波比为 $1.12 \sim 1.27$, 信号发生器驻波比为 1.4 , (频率范围: $250\text{kHz} \sim 26.5\text{GHz}$); NRP-Z55功率敏感器驻波比为 $1.12 \sim 1.16$, 信号发生器驻波比为 1.4 , (频率范围: $250\text{kHz} \sim 40\text{GHz}$), 在区间内为反正弦分布, 取 $k = \sqrt{2}$ 则该项引入的不确定度:

NRP-Z37功率敏感器:

NRP-Z55功率敏感器:

b 射频量程转换引入的不确定度:

由说明书知, 量程转换引入的误差为 $\pm 0.005\text{dB} \sim \pm 0.015\text{dB}$, 取 $k = \sqrt{3}$, 则:

$$u_2 = \frac{a}{k} = (0.0029 \sim 0.0087) \text{dB}$$

c 标准测量不准确引入的不确定度

根据校准证书, 测量相对电平时, 测量接收机引入的测量不确定度为 $0.03\text{dB}/10\text{dB}$, $k = 2$, 则:

$$u_2 = \frac{a}{k} = (0.015 \sim 0.14) \text{dB}$$

d 分辨力引入的不确定度:

相对测量时, 分辨力为 0.001dB , 服从均匀分布, 取 $k = \sqrt{3}$, 则:

$$u_4 = \frac{a}{k} = \frac{0.001}{\sqrt{3}} \text{dB} = 0.00029\text{dB}$$

e 失配引入的不确定度:

测量接收机端口驻波比为 1.08 , 信号发生器驻波比为 1.4 , (频率范围: $250\text{kHz} \sim 40\text{GHz}$), 在区间内为反正弦分布, 取 $k = \sqrt{2}$, 则该项引入的不确定度:

$$a = 2 \times \frac{1.08-1}{1.08+1} \times \frac{1.4-1}{1.4+1} = 0.013, u_5 = \frac{a}{k} = 0.009, \text{转换为}$$

对数形式, $u_5 = 0.08\text{dB}$

f 测量重复性引入的不确定度:

在相同条件下, 使用该标准对信号发生器输出功率进行测量, 得到其重复性

则:

$$-10\text{dB} (250\text{kHz}) \text{ 时, } u_6 = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = \frac{0.011}{\sqrt{10}} = 0.003\text{dB}$$

$$-50\text{dB} (250\text{kHz}) \text{ 时, } u_6 = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = \frac{0.011}{\sqrt{10}} = 0.003\text{dB}$$

$$-90\text{dB} (250\text{kHz}) \text{ 时, } u_6 = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = \frac{0.07}{\sqrt{10}} = 0.022\text{dB}$$

$$-10\text{dB} (40\text{GHz}) \text{ 时, } u_6 = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = \frac{0.04}{\sqrt{10}} = 0.013\text{dB}$$

$$-50\text{dB} (40\text{GHz}) \text{ 时, } u_6 = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = \frac{0.06}{\sqrt{10}} = 0.02\text{dB}$$

$$-90\text{dB} (40\text{GHz}) \text{ 时, } u_6 = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = \frac{0.04}{\sqrt{10}} = 0.013\text{dB}$$

2.3 调幅深度测量不确定度

校准信号发生器调幅深度使用测量接收机直接测量被校信号发生器输出信号的调幅深度。

使用FSMR测量接收机测量调幅深度的不确定度来源主要有: 标准测量不准确、剩余调幅、分辨力、重复性等^[3]。

a 标准测量不准确引入的不确定度 u_1

由说明书知, FSMR43测量接收机测量调幅度最大允许误差为 $\pm 1.5\%$ (250kHz~10MHz), $\pm 1\%$ (10MHz~40GHz) 测量30%调幅度时, 服从按均匀分布, 取 $k = \sqrt{3}$, 则:

$$250\text{kHz} \sim 10\text{MHz}, a = 0.45\%, u_1 = \frac{a}{k} = 0.26\%$$

$$10\text{MHz} \sim 40\text{GHz}, a = 0.3\%, u_1 = \frac{a}{k} = 0.17\%$$

b 测量重复性引入的不确定度 u_2

在相同条件下, 使用该标准对信号发生器, 调幅30%进行测量, 得到其重复性:

250kHz时, $s(x) = 0.006\%$; 40GHz时, $s(x) = 0.005\%$, 则: 重复性引入的不确定度:

$$250\text{kHz}, u_2 = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = 0.0019\%$$

$$40\text{GHz}, u_2 = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = 0.0016\%$$

c 读数分辨力引入的不确定度 u_3

以测调幅30%为例, 分辨力为0.001%, 服从均匀分布, 取 $k = \sqrt{3}$, 则:

$$u_3 = \frac{a}{k} = \frac{0.001\%}{\sqrt{3}} = 0.00029\%$$

d 测量接收机剩余调幅引入的不确定度

由说明书知, FSMR43测量接收机剩余调幅小于0.03%, 测量30%调幅深度时, 服从按均匀分布, 取 $k = \sqrt{3}$, 则:

$$a = 0.03\%, u_4 = \frac{a}{k} = 0.02\%$$

2.4 调频频偏测量不确定度

使用测量接收机直接测量被校信号发生器输出信号的调频频偏。

使用FSMR测量接收机测量调频频偏的不确定度来源主要有: 标准测量不准确、剩余调频、分辨力、重复性等。

a 标准测量不准确引入的不确定度

由说明书知, FSMR43测量接收机测量调频频偏最大允许误差为 $\pm 1\%$, 测量50kHz调频频偏时, 误差为 $\pm 0.50\text{kHz}$, 服从按均匀分布, 取 $k = \sqrt{3}$, 则:

$$u_1 = \frac{a}{k} = 0.289\text{kHz}$$

b 测量重复性引入的不确定度

在相同条件下, 使用该标准对信号发生器在40GHz, 频偏50kHz进行测量, 得到其重复性 $s(x) = 0.007\text{kHz}$, 则:

$$u_2 = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = 0.002\text{kHz}$$

c 读数分辨力引入的不确定度

以测40GHz, 频偏50kHz为例, 分辨力为0.01kHz, 服从均匀分布, 取 $k = \sqrt{3}$, 则:

$$u_3 = \frac{a}{k} = \frac{0.01}{\sqrt{3}} = 0.0029\text{kHz}$$

d 测量接收机剩余调频引入的不确定度

由说明书知, FSMR43测量接收机剩余调频小于110Hz, 测量频偏50kHz时, 服从按均匀分布, 取 $k = \sqrt{3}$, 则:

$$a = 110\text{Hz}, u_4 = \frac{a}{k} = 63.5\text{Hz}$$

e 合成标准不确定度

读数分辨力引入的不确定度和测量重复性引入的不确定度比较, 取其大者, 则:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 0.29\text{kHz}$$

2.5 调相相偏测量不确定度

使用测量接收机直接测量被校信号发生器输出信号的调相相偏。

使用FSMR测量接收机测量调相相偏的不确定度来源主要有: 标准测量不准确、上级校准不准确、分辨力、

重复性等。

a 标准测量不准确引入的不确定度

由说明书知,FSMR43测量接收机测量调相相偏最大允许误差为±1%,测量100 rad调相相偏时,误差为±1 rad,服从按均匀分布,取 $k = \sqrt{3}$,则:

$$u_1 = \frac{a}{k} = 0.58 \text{ rad}$$

b 测量重复性引入的不确定度

在相同条件下,使用该标准对信号发生器在40GHz,调相相偏100 rad进行测量,得到其重复性 $s(x) = 0.14 \text{ rad}$,则:

$$u_2 = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = 0.08 \text{ rad}$$

c 读数分辨力引入的不确定度

以测40GHz,调相相偏100 rad为例,分辨力为0.1 rad,服从均匀分布,取 $k = \sqrt{3}$,则:

$$u_3 = \frac{a}{k} = \frac{0.1}{\sqrt{3}} = 0.029 \text{ rad}$$

d 上级校准不准确引入的不确定度

根据校准证书,上级校准调相相偏的相对扩展不确定度为1%, $k = 2$,测量100rad调相相偏时,引入的不确定度为1 rad, $k = 2$,则:

$$u_4 = \frac{a}{k} = 0.5 \text{ rad}$$

e 合成标准不确定度

读数分辨力引入的不确定度和测量重复性引入的不确定度比较,取其大者,则:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_4^2} = 0.8 \text{ rad}$$

2.6 谐波的测量不确定度

使用测量接收机直接测量被校信号发生器输出信号的谐波。

使用FSMR测量接收机测量谐波的不确定度来源主要有:标准测量不准确、分辨力、重复性等。

a 标准测量不准确引入的不确定度

由说明书知,FSMR43测量接收机频谱分析仪频响误

差极限为:±(0.5 dB~2.0 dB),按均匀分布取 $k = \sqrt{3}$

$$u_1 = \frac{a}{k} = 0.29 \text{ dB} \sim 1.2 \text{ dB}$$

b 测量重复性引入的不确定度

在相同条件下,使用该标准对信号发生器20 GHz二次谐波进行测量,得到其重复性 $s(x) = 0.049 \text{ dB}$,则:

$$u_2 = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} = 0.016 \text{ dB}$$

c 读数分辨力引入的不确定度

分辨力为0.01 dB,服从均匀分布,取 $k = \sqrt{3}$,则:

$$u_3 = \frac{a}{k} = \frac{0.01}{\sqrt{3}} \text{ dB} = 0.0029 \text{ dB}$$

信号发生器作为最为普遍的电子设备之一,在科研生产中有着举足轻重的地位,因此,对信号发生器主要参数校准不确定度的来源进行详细的描述,给出信号发生器主要参数校准不确定度的评定过程,对计量标准的建立以及实验室校准测试能力的评价提供坚实的基础,确保信号发生器校准结果量值的准确可靠,才能更好地保障科研生产工作的正确进行。

结束语

信号发生器作为最为普遍的电子设备之一,在科研生产中有着举足轻重的地位,因此,对信号发生器主要参数校准不确定度的来源进行详细的描述,给出信号发生器主要参数校准不确定度的评定过程,对计量标准的建立以及实验室校准测试能力的评价提供坚实的基础,确保信号发生器校准结果量值的准确可靠,才能更好地保障科研生产工作的正确进行。

参考文献

[1]孙群,宋卿.基于DDS技术的便携式波形信号发生器[J].仪表技术与传感器.2009,(4).DOI:10.3969/j.issn. 1002-1841.2009.04.025 .
 [2]黄莞迪.800MSPS任意波形发生器数据处理模块设计与实现[D].2022.
 [3]王佳荣.基于DDS技术的信号发生器设计[D].2015.