



中华人民共和国工业和信息化部电子计量
技术规范

JJF(电子)XXXX—20XX

超宽带实时示波器校准规范

Calibration Specification for Ultra-high Bandwidth Real-time Oscilloscopes

(报批稿)

××××-××-××发布

××××-××-××实施

工业和信息化部 发布

超宽带实时示波器校准规范

Calibration Specification for Ultra-high
Bandwidth Real-time Oscilloscopes

JJF (电子) XXXX—20XX

归口单位：中国电子技术标准化研究院

主要起草单位：工业和信息化部电子第五研究所
深圳市万里眼技术有限公司

参加起草单位：广州赛宝计量检测中心服务有限公司

本规范委托起草单位负责解释

本规范主要起草人：段誉（工业和信息化部电子第五研究所）

刘君荣（工业和信息化部电子第五研究所）

贺鹏飞（深圳市万里眼技术有限公司）

参加起草人：顾林（工业和信息化部电子第五研究所）

申祥平（广州赛宝计量检测中心服务有限公司）

吴月辉（深圳市万里眼技术有限公司）

何玉玲（深圳市万里眼技术有限公司）

目录

引言.....	III
1 范围.....	1
2 引用文件.....	1
3 术语和计量单位.....	1
3.1 动态有效位数 (Effective Number of Bits, ENOB)	1
4 概述.....	1
5 计量特性.....	1
5.1 直流增益.....	1
5.2 直流偏置.....	2
5.3 频带宽度.....	2
5.4 上升时间.....	2
5.5 本底噪声.....	2
5.6 通道隔离度.....	2
5.7 时基.....	2
5.8 动态有效位数 (ENOB)	2
5.9 校准信号.....	2
5.10 输入电阻.....	2
5.11 触发灵敏度.....	2
5.12 最高采样率.....	3
5.13 回波损耗.....	3
6 校准条件.....	3
6.1 环境条件.....	3
6.2 校准用设备 (测量标准及其他设备)	3
7 校准项目和校准方法.....	4
7.1 校准项目.....	4
7.2 外观及工作正常性检查.....	5
7.3 直流增益.....	5
7.4 直流偏置.....	6
7.5 频带宽度.....	7
7.6 上升时间.....	8
7.7 本底噪声.....	10
7.8 通道隔离度.....	10
7.9 时基.....	11
7.10 动态有效位数.....	12
7.11 校准信号.....	12
7.12 输入电阻.....	14
7.13 触发灵敏度.....	14
7.14 最高采样率.....	15
8 校准结果表达.....	16

9 复校时间间隔 17

附录 A 原始记录内页格式 18

附录 B 校准证书内页格式 22

附录 C 反卷积运算 26

附录 D 动态有效位 28

附录 E 测量不确定度评定示例 31

引 言

JJF1071-2010 《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001-2011 《通用计量术语及定义》和 JJF1059.1-2012 《测量不确定度评定与表示》共同构成支撑本规范编制工作的基础性系列规范。

超宽带实时示波器校准规范

1 范围

本规范适用于带宽 20GHz~80GHz 的实时示波器的校准，带宽 80GHz 以上的实时示波器可参照执行。

2 引用文件

JJG 278-2022 示波器校准仪检定规程

GJB 7691-2012 数字示波器检定规程

IEEE Std 1057 数字波形记录仪标准 (IEEE Standard for Digitizing Waveform Recorders)

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改版）适用于本规范。

3 术语和计量单位

3.1 动态有效位数 (Effective Number of Bits, ENOB)

以模数转换方式进行波形测量时，对波形测量结果带来的附加信噪失真比所对应的理想模数转换位数。单位：Bit。

注：1) 信噪失真比也称为信纳比，通常在正弦波形测量时进行定义；2) 影响有效位数的误差因素，包括测量系统的本底噪声、量化误差、线性度等。

2) 本术语来源于 IEEE Std 1057 数字波形记录仪标准。

4 概述

超宽带实时示波器 (Ultra-High Bandwidth Real-Time Oscilloscope) 特指模拟带宽不低于 20GHz 的实时示波器，是一类可对输入电信号实施实时捕获、运算分析与波形复现显示的时域测量仪器。该类仪器具备随信号瞬态变化同步刷新波形显示的固有技术特征，可实现周期信号、瞬态脉冲信号及各类复杂电气现象的时域观测、参数测量与特性分析，尤其适用于高速瞬变、超高频率信号的精准捕获与测试场景。其工作基本原理为：对输入信号，由时基电路控制采样系统按照一定时间间隔进行采样，经模数转换后转成数字信号进行存储，根据触发系统(模拟触发/数字触发/外部触发等)产生的触发信号从存储中选取合适的数字波形进行重建并显示在屏幕上。

5 计量特性

5.1 直流增益

垂直偏转系数：1mV/div~1V/div

最大允许误差：± (1%~4%)

5.2 直流偏置

范围：-4V~4V

最大允许误差： $\pm(1\% \times \text{满度值} + 2\% \times \text{偏移值} + 1\text{mV})$

5.3 频带宽度

20GHz~80GHz

5.4 上升时间

$\leq 5.5\text{ps}$

注：5.5ps 上升时间是由 80GHz 带宽根据转换系数公式计算得到，上升时间和带宽的转换系数公式如式 (1) 所示。

$$t_r \cdot BW = K \quad (1)$$

式中：

t_r ——实时示波器过渡持续时间，s；

BW ——实时示波器带宽，Hz；

K ——转换系数（通常取值范围为 0.35~0.45）。

5.5 本底噪声

范围：0.5mV~50mV（与频段和垂直挡位有关）

5.6 通道隔离度

范围：20dB~70dB

5.7 时基

水平偏转系数：1ps/div~10000s/div

时基最大允许误差： $\pm(1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-8})$

5.8 动态有效位数（ENOB）

(4~9) bit

5.9 校准信号

方波校准信号频率：1kHz~5MHz，最大允许误差 $\pm(1 \times 10^{-3} \sim 1 \times 10^{-6})$

方波校准信号幅度：20mV~5V，最大允许误差 $\pm(0.5\% \sim 2\%)$

DC 校准信号幅度： $\pm(5\text{mV} \sim 5\text{V})$ ，最大允许误差 $\pm(0.01\% \sim 1\%)$

5.10 输入电阻

范围：50 Ω ，最大允许误差 $\pm(1\% \sim 3\%)$ ；

5.11 触发灵敏度

范围：内触发灵敏度（边沿触发）：(0.1~4) div（分频段）

外触发灵敏度（边沿触发）：(50~800) mV（分频段）

5.12 最高采样率

50 GSa/s~320 GSa/s

5.13 回波损耗

5dB~60dB

注 1: 以上技术指标不作为合格判据, 仅提供参考, 具体以说明书技术指标为准。

6 校准条件

6.1 环境条件

- a) 环境温度: $(23 \pm 5) ^\circ\text{C}$
- b) 相对湿度: $\leq 80\%$
- c) 供电电源: $(220 \pm 11) \text{ V}$, $(50 \pm 1) \text{ Hz}$
- d) 其它: 具备静电防护措施, 周围无影响仪器正常工作的电磁干扰及机械振动。

6.2 校准用设备 (测量标准及其他设备)

6.2.1 示波器校准仪

直流电压: 阻抗 50Ω , $\pm(1\text{mV} \sim 5\text{V})$, 最大允许误差: $\pm 0.3\%$

方波信号: 阻抗 50Ω , $(1\text{mV} \sim 5\text{V})$, 最大允许误差: $\pm 0.3\%$

时标信号: $200\text{ps} \sim 10\text{s}$, 最大允许误差 $\pm 3 \times 10^{-7}$

电阻测量: $40\Omega \sim 60\Omega$, 最大允许误差: $\pm 0.1\%$

注: 也可分别用技术性能满足要求的直流电压源、方波信号发生器、稳幅正弦波信号发生器、时标信号发生器、电阻测量仪、LCR 测试仪等设备。

6.2.2 微波信号源

频率范围: $9\text{kHz} \sim 67\text{GHz}$, 最大允许误差: $\pm 1 \times 10^{-7}$

相位噪声: $\leq -110\text{dBc/Hz}$, 频偏 $\geq 10\text{kHz}$ (中心频率 $1\text{GHz} \sim 10\text{GHz}$)

输出电平: $-50\text{dBm} \sim 13\text{dBm}$

注: 此处频率上限可根据能够覆盖被校对象的带宽上限来确定。

6.2.3 信号源扩频器

频率范围: $60\text{GHz} \sim 90\text{GHz}$

输出电平: $-50\text{dBm} \sim 10\text{dBm}$

注: 此处频率上限可根据能够覆盖被校对象的带宽上限来确定。

6.2.4 功率计(含功率传感器)

频率范围: $\text{DC} \sim 80\text{GHz}$

功率测量范围: $-35\text{dBm} \sim +20\text{dBm}$, 校准因子不确定度: $2\% \sim 4\%$ ($k=2$)

注: 此处频率上限可根据能够覆盖被校对象的带宽上限来确定。

6.2.5 数字多用表

直流电压测量: $\pm(1\text{mV} \sim 10\text{V})$, 最大允许误差: $\pm 0.001\%$

交流电压测量：10mV~10V，最大允许误差：±0.01%

电阻测量：40Ω~1.2MΩ，最大允许误差：±0.1%

6.2.6 快沿脉冲信号发生器

波形：方波

幅度：≥500mV

上升时间：<10ps

注：适用于 63GHz 带宽以下的示波器上升时间的校准。

6.2.7 超快光电脉冲产生装置

波形：高斯脉冲

幅度：≥6mV

上升时间：<3.5ps

注：此处上升时间根据公式（1）计算得到。对于标准脉冲法，计算用的带宽值至少为被校对象带宽的 3 倍。对于卷积脉冲法，计算用的带宽值至少大于等于被校对象带宽。

6.2.8 功分器

频率范围：DC~80GHz

端口不平衡度：DC~80GHz，≤0.5dB

注：此处频率上限可根据能够覆盖被校对象的带宽上限来确定。

6.2.9 原子钟

相对频率偏差：±2×10⁻¹⁰

6.2.10 频率计

频率范围：10Hz~300MHz，最大相对频率偏差：±（1×10⁻⁶~1×10⁻⁸）

6.2.11 网络分析仪

频率范围：10MHz~80GHz，动态范围：≥80 dB

注：此处频率上限可根据能够覆盖被校对象的带宽上限来确定。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

超宽带实时示波器校准项目见表 1。

表 1 超宽带实时示波器校准项目表

序号	校准项目名称
1	直流增益
2	直流偏置
3	频带宽度
4	上升时间
5	本底噪声
6	通道隔离度

序号	校准项目名称
7	时基
8	动态有效位数
9	校准信号
10	输入电阻
11	触发灵敏度
12	最高采样率
13	回波损耗

7.2 外观及工作正常性检查

7.2.1 外观检查

检查被校示波器的外观是否完好，无影响正常工作的机械损伤。检查结果记录于附录 A 表 A.1 中。

7.2.2 工作正常性

开机后按照规定时间预热，无规定时一般按照半小时预热，之后示波器应进行全面的自检和自校准，观察屏幕有无错误信息提示。如有温度信号补偿功能和时基校准功能，按示波器的提示进行连接校准。

将被校示波器输出的校准信号或示波器校准仪输出的标准方波信号接至被校示波器的输入通道，调节前面板各控制旋钮或屏幕菜单使波形能够稳定显示。有多个通道的示波器应逐个通道进行检查。

仪器说明书有其它要求时，按说明书要求进行其它功能检查，检查结果需要满足说明书要求。检查结果记录于附录 A 表 A.1 中。

注：对于有佩戴防静电手环要求的示波器，需要佩戴防静电手环进行操作。

7.3 直流增益

7.3.1 方波法

7.3.1.1 如图 1 所示连接设备，调用被校示波器出厂默认设置，选定测量通道，设置为 DC 耦合、内触发、带宽限制按说明书要求设置，关闭其他通道，水平挡位设为合适值，垂直挡位设为最小。

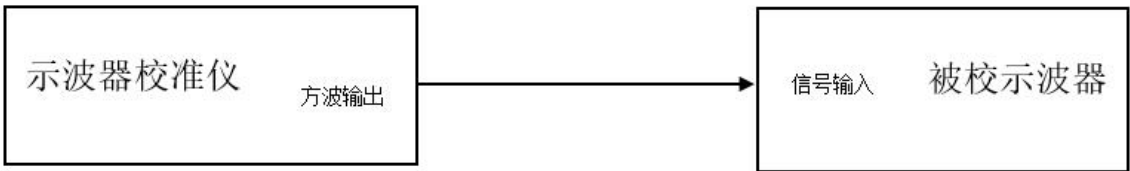


图 1 直流增益的校准连接框图（方波法）

7.3.1.2 示波器校准仪电阻设置与示波器一致，输出对称方波频率 1kHz，方波电压信号幅度 U ，一般为被校示波器垂直挡位的 6 倍或 8 倍（即 6div 或 8div）；用示波器的自动

测量功能读取幅度 U_r ，记下测量值。

7.3.1.3 按式 (2) 计算直流增益 G ：

$$G = \frac{U_r}{U} \quad (2)$$

7.3.1.4 按从低到高的顺序设置垂直挡位，重复步骤 7.3.1.1~7.3.1.3。

7.3.1.5 重复步骤 7.3.1.1~7.3.1.4，对被校示波器各通道直流增益分别进行测量。

7.3.2 直流法

7.3.2.1 按图 2 连接仪器，调用示波器出厂默认设置，选定测量通道，设置为 DC 耦合、内触发、带宽限制按说明书要求设置，关闭其他通道，垂直挡位设为最小。

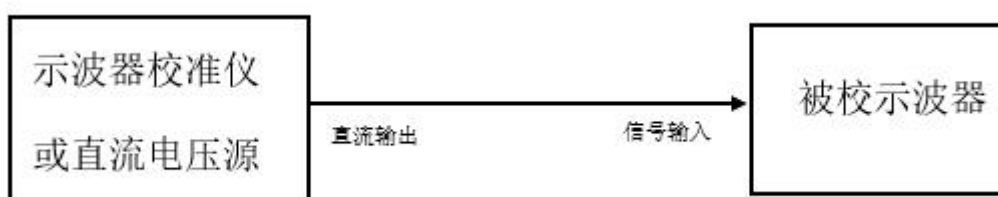


图 2 直流增益/直流偏置的校准连接框图（直流法）

7.3.2.2 示波器校准仪电阻设置与示波器一致，输出正直流电压信号 U_+ ，一般为被校示波器垂直挡位的 3 倍或 4 倍（即 3div 或 4div）。用示波器的自动测量功能读取幅度 U_{r+} ，记下测量值。

7.3.2.3 示波器校准仪输出负直流电压信号 U_- ，一般为被校示波器垂直挡位的 3 倍或 4 倍（即 3div 或 4div）。用示波器的自动测量功能读取幅度 U_r ，记下测量值。

7.3.2.4 按式 (3) 计算直流增益 G ：

$$G = \frac{U_{r+} - U_r}{U_+ - U_-} \quad (3)$$

7.3.2.5 按从低到高的顺序设置垂直挡位，重复步骤 7.3.2.1~7.3.2.4。

7.3.2.6 重复步骤 7.3.2.1~7.3.2.5，对被校示波器各通道直流增益分别进行测量。

7.4 直流偏置

7.4.1 按图 2 连接仪器，调用被校示波器出厂默认设置，选定测量通道，设置为 DC 耦合、内触发、带宽限制按说明书要求设置，关闭其他通道，根据被校示波器说明书，选择偏置范围。

7.4.2 设置被校示波器直流偏置为所选偏置范围内正向最大值，将垂直挡位设置为该范围内最小值。

7.4.3 设置示波器校准仪为直流电压输出功能，电阻设置与示波器一致，输出电压值为被校示波器设置的直流偏置电压 D_0 ，波形出现在屏幕中央附近，用示波器自动测量功能测量电压平均值 D_r ，记下测量结果。

7.4.4 按公式 (4) 计算直流偏置误差 ΔD :

$$\Delta D = D_r - D_0 \quad (4)$$

7.4.5 设置被校示波器直流偏置为所选偏置范围内负向最大值 (可直接设置极性反转), 将垂直挡位设置为该范围内最小值, 重复步骤 7.4.3、7.4.4。

7.4.6 设置不同的直流偏置范围, 重复步骤 7.4.2~7.4.5。

7.4.7 重复步骤 7.4.1~7.4.6, 对被校示波器各通道直流偏置分别进行测量。

7.5 频带宽度

7.5.1 方法一: 测标称带宽处幅度变化量

7.5.1.1 按图 3 连接仪器, 必要时加入信号源扩频器将频率范围扩展至标称带宽。

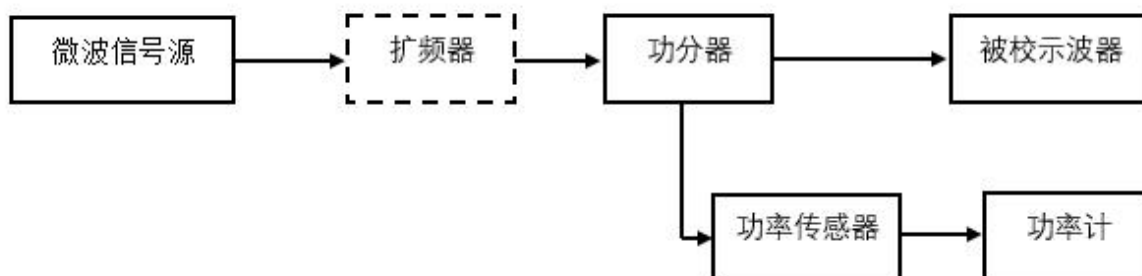


图 3 频带宽度的校准连接框图

7.5.1.2 调用被校示波器出厂默认设置, 选定测量通道, 设置为 DC 耦合、内触发, 关闭其他通道。

7.5.1.3 设置信号发生器的输出频率为参考频率点 (建议频率设为 100MHz 或仪器说明书中给出的参考频率), 调节信号发生器输出电压, 使信号显示高度为屏幕的 80% 左右, 记录此时的功率计指示值 P_0 , 用示波器自动测量功能测量此时对应的信号幅度 U_0 。

7.5.1.4 设置信号发生器的输出频率为被校示波器频率上限值 (带宽标称值), 调节信号发生器输出电压, 使功率计监测的功率接近参考频率的功率 P_0 , 记录此时的功率计指示值 P_r , 用示波器自动测量功能测量此时对应的信号幅度 U_r 。

7.5.1.5 使用式 (5) 计算标称带宽内下降 (或上升) 的分贝数, 并记录测量结果:

$$A_{BW} = 20 \lg \frac{U_r}{U_0} + P_0 - P_r \quad (5)$$

式中:

U_0 — 参考频率点对应的波形幅度值, V;

U_r — 上限频率点 (带宽标称值) 对应的波形幅度值, V;

P_0 — 参考频率点的功率值, dBm;

P_r — 标称带宽频率点对应的功率值, dBm;

A_{BW} — 标称带宽内下降(或上升)的分贝数, dB。

7.5.1.6 重复步骤 7.5.1.1~7.5.1.5, 对被校示波器各通道频带宽度分别进行测量。

7.5.2 方法二: 测幅度变化 3dB 处频率值

7.5.2.1 按图 3 连接仪器, 必要时加入信号源扩频器将频率范围扩展至标称带宽。

7.5.2.2 调用被校示波器出厂默认设置, 选定测量通道, 设置为 DC 耦合、内触发, 关闭其他通道。

7.5.2.3 设置信号发生器输出频率为参考频率点 (建议频率设为 100MHz 或仪器说明书中给出的参考频率), 调节输出功率, 使信号显示高度为屏幕的 80% 左右, 用示波器自动测量功能测量信号幅度 U_0 , 记录此时的功率计指示值 P_0 。

7.5.2.4 均匀改变信号发生器的输出频率, 调节信号发生器输出功率, 保持功率计指示值接近参考频率的功率 P_0 附近, 记录此时的功率指示值 P_i ; 用示波器自动测量功能测量各频率点对应的信号幅度 U_i 。

7.5.2.5 当按照式 (5) 计算带宽内下降分贝数 A_{BW} 等于 -3dB 时, 输出的频率值即为被校示波器频带宽度的测量结果, 记录测量结果。

7.5.2.6 重复步骤 7.5.2.1~7.5.2.5, 对被校示波器各通道频带宽度分别进行测量。

7.6 上升时间

7.6.1 方法一: 标准快沿法



图 4 上升时间的校准连接框图

7.6.1.1 按图 4 连接仪器, 调用被校示波器出厂默认设置, 选定测量通道, 设置为 DC 耦合、内触发, 关闭其他通道。

7.6.1.2 设置快沿脉冲信号发生器为快沿脉冲信号输出功能, 调节示波器偏置或幅度挡位, 使输入阶跃脉冲幅度居中覆盖约 80% 屏幕范围, 调节示波器水平挡位及触发电平, 使信号稳定显示如图 5 所示的脉冲波形。

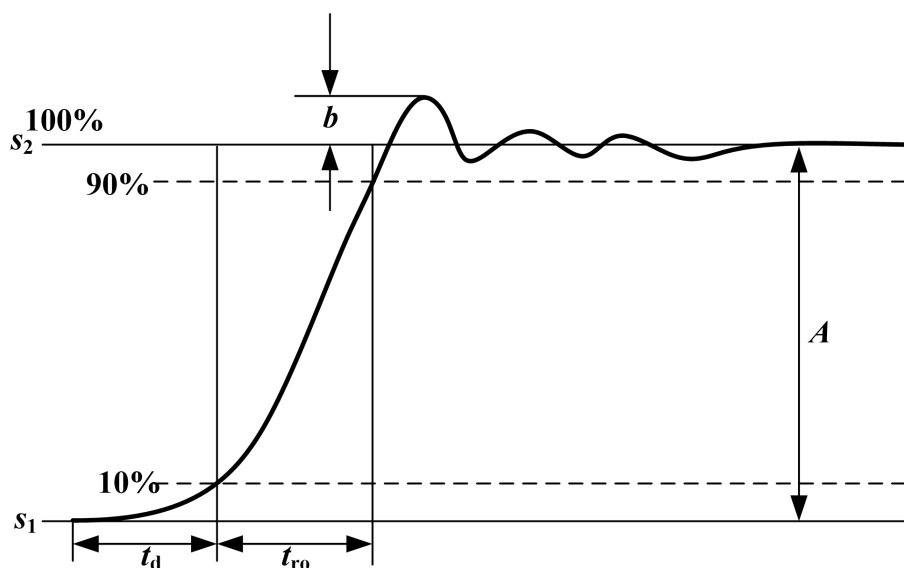


图5 瞬态响应波形示意图

7.6.1.3 用被校示波器自动测量功能测量 10%~90%上升时间或用被校示波器的光标测量功能测量图 5 中的上升时间 t_{ro} 。

7.6.1.4 设置信号幅度为被校示波器屏幕垂直量程的 80%。

7.6.1.5 如果被校示波器上升时间的标称值大于快沿脉冲上升时间的 3 倍,直接记录测得的上升时间,否则按式 (6) 计算被校示波器的上升时间,记录结果:

$$t_{rs} = \sqrt{t_{ro}^2 - t_{rp}^2} \quad (6)$$

式中:

t_{rs} — 被校示波器的上升时间, s;

t_{ro} — 被校示波器屏幕上测量的上升时间, s;

t_{rp} — 标准快沿脉冲的上升时间, s。

7.6.1.6 调整不同垂直挡位(受限于快沿脉冲产生技术的输出幅度限制,可根据实际情况选择合适的垂直挡位进行测量),重复步骤 7.6.1.2~7.6.1.5。

7.6.1.7 重复步骤 7.6.1.2~7.6.1.6,对被校示波器各通道上升时间分别进行测量。

注:如果被校示波器上升时间的标称值小于快沿脉冲上升时间的 1.5 倍时,不建议采用此方法。

7.6.2 方法二:超快光电脉冲法

7.6.2.1 按图 6 连接仪器,将超快光电脉冲产生装置输出的超快电脉冲连接到被校示波器测量通道。



图 6 上升时间的校准连接框图

7.6.2.2 设置被校示波器的水平挡位、垂直挡位、偏置等，使超快电脉冲如图 7 所示稳定地显示在被校示波器的屏幕上。

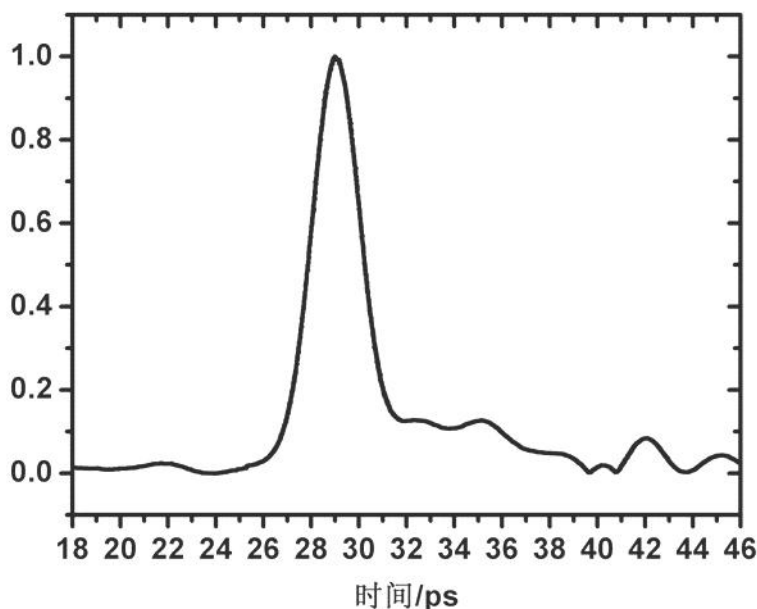


图 7 超快电脉冲波形示意图

7.6.2.3 通过计算机采集超快电脉冲在被校示波器上的响应波形。

7.6.2.4 对采集到的冲激响应进行积分运算得到阶跃响应，得到被校示波器的上升时间（在脉冲信号的上升时间大于等于示波器上升时间的 1/3 时建议采用反卷积分离法去除超快电脉冲的响应，得到被校示波器的冲激响应后，再进行积分运算，详细计算方法见附录 C），记录结果。

7.6.2.5 更换被校示波器输入通道，重复步骤 7.6.2.2~7.6.2.4，对被校示波器其它通道上升时间进行测量。

7.7 本底噪声

7.7.1 调用被校示波器出厂默认设置，选定测量通道，设置为 DC 耦合、内触发，垂直挡位设置为最小值，采样速率设置为最大值，输入端接 50Ω 终端负载，带宽设置为全带宽，关闭其他通道。

7.7.2 用被校示波器自动测量功能测量显示波形幅度的有效值，该值即为选定测量通道的本底噪声，记录结果。

7.7.3 设置被校示波器垂直挡位为说明书要求的其他挡位，其他设置不变，重复步骤 7.7.2。

7.7.4 重复步骤 7.7.1~7.7.3，对被校示波器各通道本底噪声分别进行测量。

7.8 通道隔离度

7.8.1 按图 8 连接仪器，调用被校示波器出厂默认设置，选定干扰通道，设置垂直挡位为最大，微波信号源输出信号到干扰通道，幅度为示波器最大测量电压值的 80%、输出

频率为上限截止频率或仪器说明书规定的频率值。用示波器的自动测量功能测量信号幅度 U_a 。

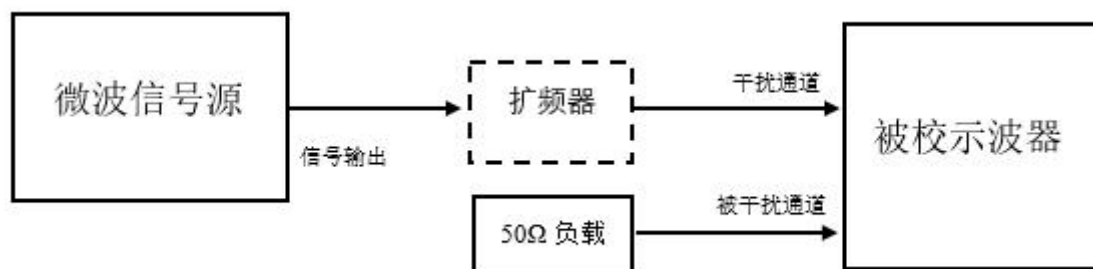


图8 通道隔离度的校准连接框图

7.8.2 选定被校示波器的测量通道（被干扰通道），输入端接 50Ω 终端负载，设置垂直挡位为最小，用示波器的自动测量功能测量信号幅度 U_b 。

7.8.3 按式（7）计算通道间隔离度 I ，记录结果：

$$I = 20 \log \frac{U_a}{U_b} \quad (7)$$

7.8.4 重复步骤 7.8.1~7.8.3，示波器按照输入通道两两组合的方式，对各通道隔离度分别进行测量。

7.9 时基

7.9.1 频率计法

7.9.1.1 对有参考时钟（频率为 F ）输出的被校示波器，按图 9 连接仪器，将示波器的参考时钟输出接到频率计的输入端。

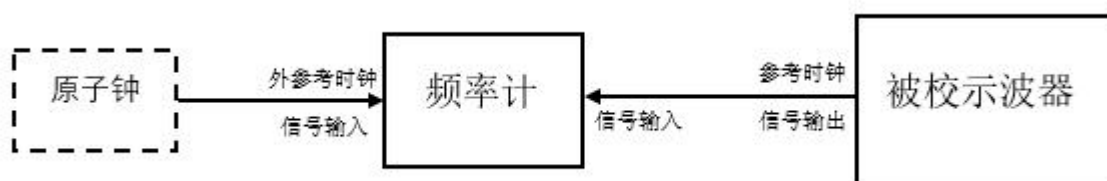


图9 时基的校准连接框图

7.9.1.2 用频率计的频率测量功能，测出参考时钟频率测量值 F_0 ，按式（8）计算被校示波器输出参考频率的误差 δ_f ，记录结果：

$$\delta_f = F - F_0 \quad (8)$$

注：该方法适合于有参考频率输出端口的示波器，测量结果只体现被校示波器内部时钟的准确度。

7.9.2 示波器校准仪法

7.9.2.1 按图 10 连接仪器，调用被校示波器出厂默认设置，选定测量通道。



图 10 时基的校准连接框图

7.9.2.2 使用示波器校准仪输出适当幅度和周期的时标信号（信号频率 F_0 ），调节被校示波器的水平挡位、垂直挡位、直流偏置和触发等，使 3 个以上周期的信号稳定居中显示，信号幅度占屏幕的 80% 左右。

7.9.2.3 使用示波器的频率测量功能测量获得信号频率值 F ，按式(8)计算通道时基误差 δ_t ，记录结果。

7.9.3 延迟法

见 GJB 7691-2012 中 9.10.1 “方法一”。

7.9.4 混叠频率法

见 GJB 7691-2012 中 9.10.2 “方法二”。

7.10 动态有效位数



图 11 动态有效位数的校准连接框图

7.10.1 按照图 11 连接仪器，调用被校示波器出厂默认设置，选定测量通道。

7.10.2 设置示波器为最高采样率、采集点数 $n \geq 1000$ ；微波信号源输出标准正弦信号到被校示波器，选取频率需满足整周期无公因子原则、幅度约覆盖量程 95% 的信号，居中输入示波器并采集时域数据。。

7.10.3 时域数据采集完成后利用计算机对数据进行计算处理，处理方式主要有时域法和频域法两种。时域法对采集数据做最小二乘正弦拟合，通过计算采样值与拟合信号的残差均方根，结合通道满量程按照公式进行计算得到结果。频域法对采集到的时域数据进行 FFT 变换至频域，计算信号总功率与主信号功率，得到信号对噪声的失真比，再根据公式计算动态有效位。两种方法的具体内容见附录 D。

7.11 校准信号

7.11.1 方波校准信号频率

7.11.1.1 按图 12 连接仪器，调用被校示波器出厂默认设置，将被校示波器的校准信号

(频率 f) 输出接到频率计的输入端。



图 12 方波校准信号频率的校准连接框图

7.11.1.2 用频率计的频率测量功能，测出参考频率测量值 f_0 ，按式（9）计算被校示波器校准信号频率的相对误差 δ_f ，记录结果。

$$\delta_f = \frac{f - f_0}{f_0} \quad (9)$$

7.11.2 方波校准信号幅度

7.11.2.1 方法一

7.11.2.1.1 按图 13 连接仪器，将被校示波器的校准信号匹配接入数字多用表的电压测量输入端。



图 13 方波/直流校准信号幅度的校准连接框图

7.11.2.1.2 设置数字多用表为直流采样功能，量程设置为“自动”，设置积分周期与采样延迟时间，测量方波波形顶部电压值 U_h 和底部电压值 U_l ，例如方波信号频率为 1kHz 时，数字表积分周期(NPLC)置为“0.01”，采样延迟时间分别设为(0.0012s, 0.0007s)。

7.11.2.1.3 按式（10）计算被校示波器校准信号幅度的相对误差，记录结果。

$$\delta_u = \frac{U - (U_h - U_l)}{U_h - U_l} \times 100\% \quad (10)$$

式中：

U — 校准信号幅度标称值，V；

U_h — 校准信号顶部电压测量值，V；

U_l — 校准信号底部电压测量值，V；

δ_u — 校准信号幅度相对误差。

7.11.2.2 方法二

见 JJG 278-2022 中附录 A “校准仪方波校准电压检定方法二”。

7.11.3 直流校准信号幅度

7.11.3.1 按图 13 所示连接仪器，将被校示波器的直流校准信号输入数字多用表。

7.11.3.2 设置数字多用表为直流电压测量功能，量程设置为“自动”，读取数字多用表显示的幅度值。

7.11.3.3 按式 (11) 计算被校示波器校准信号幅度的误差，记录结果。

$$\delta_d = U_d - U_{d0} \quad (11)$$

式中：

δ_d — 直流校准信号幅度的误差；

U_d — 校准信号(直流)幅度标称值，V；

U_{d0} — 校准信号(直流)幅度测量值，V。

7.12 输入电阻

7.12.1 按图 14 连接仪器，调用被校示波器出厂默认设置，选定被测量通道，设置 DC 耦合。

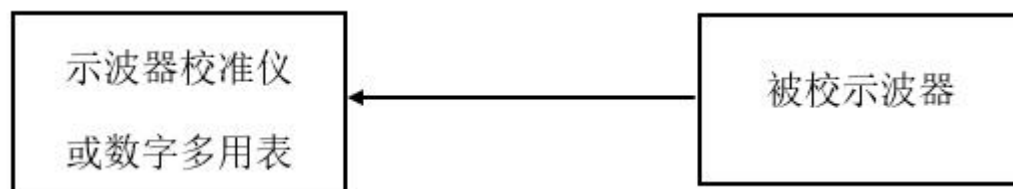


图 14 输入电阻的校准连接框图

7.12.2 数字多用表置“四线电阻”测量状态，用同轴转香蕉接头的电缆，香蕉接头端接至数字多用表的四线测量连接端，同轴接头接至被校示波器选定输入端，如果用具有电阻测量功能的示波器校准仪，直接将示波器校准仪的输出通道接至被校示波器选定测量通道输入端，设置示波器校准仪为对应量程的测量功能。

7.12.3 按式 (12) 计算被校示波器输入电阻误差 δ_R ，记录结果：

$$\delta_R = R_i - R_0 \quad (12)$$

式中：

δ_R — 输入电阻误差， Ω ；

R_0 — 输入电阻测量值， Ω ；

R_i — 输入电阻标称值， Ω ；

7.12.4 重复步骤 7.12.1~7.12.3，对被校示波器各通道输入电阻分别进行测量。

注：由于数字多用表测量电阻需要给被测电阻加载电压信号，若该电压超出示波器量程时，输入电阻读值将不正确，应注意选择合适的示波器量程进行输入电阻测量。

7.13 触发灵敏度

7.13.1 内触发灵敏度（边沿触发）

7.13.1.1 按图 8 连接仪器，调用被校示波器出厂默认设置，选定测量通道，设置为 DC 耦合、内触发、单次触发模式、上升沿触发，关闭其他通道，将垂直挡位和水平挡位置

合适挡位。

7.13.1.2 用微波信号发生器产生一个标准正弦信号，设置频率为被校示波器带宽的上限频率或仪器说明书上规定的值，调节触发电平使屏幕波形稳定显示，不断减小输出信号幅度，直至触发灵敏度标称值，反复调节示波器触发电平，观测屏幕能否稳定显示。

7.13.1.3 设置示波器为下降沿触发，重复步骤 7.13.1.2，记录结果。

7.13.1.4 重复步骤 7.13.1.1~7.13.1.3，对被校示波器其它各通道的内触发灵敏度分别进行测量。

7.13.2 外触发灵敏度（边沿触发）

7.13.2.1 按图 15 连接仪器，调用被校示波器出厂默认设置，选定被测量通道，设置为 DC 耦合、外部触发，单次触发，关闭其他通道，将微波信号发生器产生的标准正弦信号分两路，一路接入被校示波器选定的测量通道，一路接入被校示波器的外触发或辅助触发通道（对应图 15 中的 CHB），将垂直挡位和水平挡位置合适挡位。

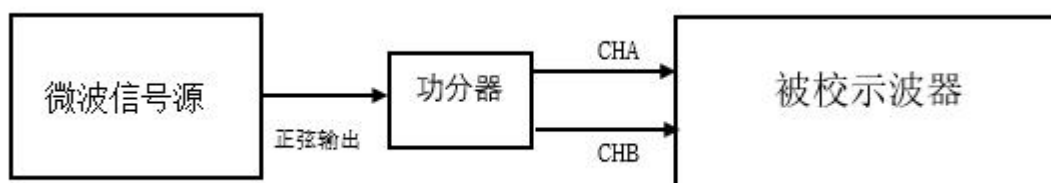


图 15 外触发灵敏度的校准连接框图

7.13.2.2 用微波信号发生器产生一个标准正弦信号，设置信号频率为被校示波器带宽的上限频率或仪器说明书上规定的值，调节信号幅度和示波器触发电平，不断减小信号幅度使波形刚好能稳定显示，记下此时的波形幅度，记录结果。

7.14 最高采样率

7.14.1 按图 8 连接仪器，调用被校示波器出厂默认设置，选定测量通道，设置为 DC 耦合、内触发。

7.14.2 将被校示波器置于实时取样状态、点显示方式工作，设置采样率为最高，水平挡位为最小。

7.14.3 用示波器校准仪或正弦信号发生器产生一个标准正弦信号，设置合适的信号幅度和频率，使屏幕上稳定显示 2~3 个周期的波形。

7.14.4 将示波器波形存储的波形导出到计算机，通过 excel 等数据处理软件对周期 T 内的采样点数 P 进行记录和计算。按式（13）计算被校示波器的最高采样率 r_{sa} ，记录结果。

$$r_{sa} = \frac{P}{T} \quad (13)$$

注：对于打开不同通道数时采样率有区别的示波器，应分别测量不同通道打开时的最高采样率。

7.14.5 如果测得的最高采样率 r_{sa} 与示波器标称的最高采样率 R 一致, 则示波器该功能正常, 如果不一致则功能不正常, 在表格中记录相应结果。

7.15 回波损耗

7.15.1 调用被检示波器出厂默认设置, 选定测量通道, 设置合适的垂直挡位 (或按说明书要求设置);

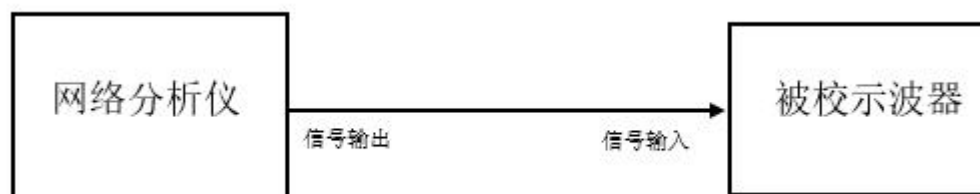


图 16 回波损耗/驻波比的校准连接框图

7.15.2 网络分析仪设定为单端口测量状态, 设置网络分析仪最低输出频率作为其扫频的起始频率, 选择被测示波器带宽频率做为其扫频的终止频率, 设置合适的扫频步长, 单端口校准后按图 16 连接仪器, 调整网络分析仪的输出功率使示波器显示的波形幅度适中;

7.15.3 设置网络分析仪的测量参数为回波损耗, 读取网络分析仪上显示的测量曲线最大值, 并记录回波损耗测量结果;

7.15.4 改变示波器垂直挡位, 确保垂直挡位测量范围覆盖示波器幅度测量的高中低范围, 重复步骤 7.15.1~7.15.3, 对被检示波器通道的不同垂直挡位的回波损耗分别进行测量。

7.15.5 重复步骤 7.15.1~7.15.4, 对被检示波器各通道输入端回波损耗别进行测量。

注: 该项目为选校项目, 可根据实际校准需求选择是否进行校准。。

8 校准结果表达

实时示波器校准后, 出具校准证书, 校准证书至少应包含以下信息:

- a) 标题: “校准证书”;
- b) 实验室名称和地址;
- c) 进行校准的地点(如果与实验室的地址不同);
- d) 证书的唯一性标识(如编号), 每页及总页数的标识;
- e) 客户的名称和地址;
- f) 被校对象的描述和明确标识;
- g) 进行校准的日期, 如果与校准结果的有效性和应用有关时, 应说明被校对象的接收日期;
- h) 如果与校准结果的有效性和应用有关时, 应对被校样品的抽样程序进行说明;
- i) 校准所依据的技术规范的标识, 包括名称及代号;
- j) 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明;

- k) 校准环境的描述;
- l) 校准结果及其测量不确定度的说明;
- m) 对校准规范的偏离的说明;
- n) 校准证书或校准报告签发人的签名、职务或等效标识;
- o) 校准结果仅对被校对象有效的声明;
- p) 未经实验室书面批准, 不得部分复制证书的声明。

9 复校时间间隔

复校时间间隔由用户根据使用情况自行确定, 推荐为 1 年。

附录 A 原始记录内页格式

表 A.1 外观及工作正常性检查

项目	检查结果
外观	
工作正常性	

表 A.2.1 直流增益（方法一）

通道	/div	标准值	测量值	增益	不确定度
通道 1					
⋮					
通道 4					

表 A.2.2 直流增益（方法二）

通道	/div	标准值	测量值	增益	不确定度
通道 1					
⋮					
通道 4					

表 A.3 直流偏置

通道	/div	标准值	测量值	误差	不确定度
通道 1		正向最大			
通道 1		负向最大			
⋮	⋮				
通道 4	...				

表 A.4.1 频带宽度（方法一）

通道	/div	参考频率处幅度测量值	标称带宽频率处幅度测量值	分贝数	不确定度
通道 1					
⋮					
通道 4					

表 A. 4. 2 频带宽度（方法二）

通道	/div	参考频率处幅度 测量值 V_0	$A_{BW}=-3\text{dB}$ 处 频率测量值	不确定度
通道 1				
...				
通道 4				

表 A. 5. 1 上升时间(标准快沿法)

通道	/div	测量值	不确定度
通道 1			
...			
通道 4			

表 A. 5. 2 上升时间(光电脉冲法)

通道	/div	脉冲上升时间测 量值	卷积计算上升 时间	不确定度
通道 1				
...				
通道 4				

表 A. 6 本底噪声

通道	/div	测量值	不确定度
通道 1			
通道 4			

表 A. 7 通道隔离度

通道	测量值	不确定度
通道 1~通道 2		
通道 1~通道 3		
通道 1~通道 4		
...		

表 A. 8. 1 时基（方法一）

标称值	测量值	误差	不确定度

表 A. 8. 2 时基（方法二）

通道	时基挡位	标准值	测量值	误差	不确定度
通道 1					

表 A. 9 动态有效位数

通道	/div	信号幅度	信号频率	动态有效位数	不确定度
通道 1					

表 A. 10. 1 校准信号频率

标称值	测量值	误差	不确定度

表 A. 10. 2 校准信号幅度

信号类型	标称值	顶部 测量值	底部 测量值	测量值	误差	不确定度
方波						
直流		/				

表 A. 11 输入电阻

通道	标称值	/div	测量值	误差	不确定度
通道 1	50Ω				
...					
通道 4					

表 A. 12. 1 内触发灵敏度 (边沿触发)

通道	信号频率	测量值	不确定度
通道 1			
...			
通道 4			

表 A. 12. 2 外触发灵敏度 (边沿触发)

通道	信号频率	测量值	不确定度
通道 1			
...			
通道 4			

表 A. 13 最高采样率

标称值	测量值

表 A. 14 回波损耗

通道	/div	测量值	不确定度
通道 1			
通道 4			

附录 B 校准证书内页格式

表 B.1 外观及工作正常性检查

项目	检查结果
外观	
工作正常性	

表 B.2.1 直流增益（方法一）

通道	/div	标准值	测量值	增益	不确定度
通道 1					
⋮					
通道 4					

表 B.2.2 直流增益（方法二）

通道	/div	标准值	测量值	增益	不确定度
通道 1					
⋮					
通道 4					

表 B.3 直流偏置

通道	/div	标准值	测量值	误差	不确定度
通道 1		正向最大			
通道 1		负向最大			
⋮					
通道 4					

表 B.4.1 频带宽度（方法一）

通道	/div	参考频率处幅度测量值	标称带宽频率处幅度测量值	分贝数	不确定度
通道 1					
⋮					
通道 4					

表 B. 4. 2 频带宽度 (方法二)

通道	/div	参考频率处幅度 测量值 V_0	$V_f=0.707V_0$ 处 频率测量值	不确定度
通道 1				
...				
通道 4				

表 B. 5. 1 上升时间

通道	/div	上升时间	不确定度
通道 1			
...			
通道 4			

表 B. 6 本底噪声

通道	/div	测量值	不确定度
通道 1			
...			
通道 4			

表 B. 7 通道隔离度

通道	测量值	不确定度
通道 1~通道 2		
通道 1~通道 3		
通道 1~通道 4		
...		

表 B. 8. 1 时基 (方法一)

标称值	测量值	误差	不确定度

表 B.8.2 时基 (方法二)

通道	时基挡位	标准值	测量值	误差	不确定度
通道 1					

表 B.9 动态有效位数

通道	/div	信号幅度	信号频率	动态有效位数	不确定度
通道 1					

表 B.10.1 校准信号频率

标称值	测量值	误差	不确定度

表 B.10.2 校准信号幅度

信号类型	标称值	顶部 测量值	底部 测量值	测量值	误差	不确定度
方波						
直流		/				

表 B.11 输入电阻

通道	标称值	/div	测量值	误差	不确定度
通道 1	50Ω				
...					
通道 4					

表 B. 12. 1 内触发灵敏度（边沿触发）

通道	信号频率	测量值	不确定度
通道 1			
...			
通道 4			

表 B. 12. 2 外触发灵敏度（边沿触发）

通道	信号频率	测量值	不确定度
通道 1			
...			
通道 4			

表 B. 13 最高采样率

功能	结论
最高采样率	

表 B. 14 回波损耗

通道	/div	测量值	不确定度
通道 1			
通道 4			

附录 C 反卷积运算

当脉冲信号源的上升时间大于等于示波器上升时间的 1/3 时, 建议使用本算法修正波形。若已知脉冲发生器输出的类冲激波形溯源数据 (波形溯源数据一般由上级计量单位提供, 主要包含脉冲波形的幅频响应参数和相频响应参数), 示波器可直接测量该类冲激波形, 并用计算机读取波形数据, 再用反卷积算法计算被测取样示波器的系统传递函数。反卷积算法公式如式 (C.1) 所示。

$$f_h(t) = f_m(t) \frac{1}{*} f_s(t) \quad (\text{C.1})$$

式中:

t ——具有相等时间间隔的时序数据, s;

$f_h(t)$ ——示波器系统传递函数, V;

$f_m(t)$ ——示波器测量的冲激波形数据, V;

$f_s(t)$ ——脉冲发生器输出的冲激波形溯源数据, V;

$\frac{1}{*}$ ——反卷积运算符号。

此反卷积运算可由计算机编程实现, 实现步骤如下:

a) 波形数据中应包含时序数据和幅值数据, 计算脉冲发生器输出的类冲激波形数据中时序数据的时间间隔 Δt_s , 计算示波器测量的类冲激波形数据中时序数据的时间间隔 Δt_m 。以 Δt_s 为时间间隔调整幅值数据 $f_m(t)$, 调整方法如下:

方法一: 以 Δt_s 设置示波器采样间隔, 重新测量波形获取幅值数据 $f_m(t)$ 。

方法二: 以 Δt_s 为时间间隔对幅值数据 $f_m(t)$ 做插值运算, 计算公式 (C.2) 所示。

$$f_m(t_x) = \frac{f_m(t_2) - f_m(t_1)}{t_2 - t_1} \cdot t_x + \frac{f_m(t_1)t_2 - f_m(t_2)t_1}{t_2 - t_1} \quad (\text{C.2})$$

式中:

t_1 ——具有相等时间间隔的时序数据中的时刻值, s;

t_2 ——具有相等时间间隔的时序数据中的时刻值, 位置与 t_1 相邻, 且值大于 t_1 , s;

t_x ——位置与 t_1 相邻, 且值大于 t_1 小于 t_2 的时刻值, s;

Δt_s ——时序数据的时间间隔, s;

$f_m(t_1)$ —— t_1 时刻示波器测量的波形幅值数据, V;

$f_m(t_2)$ —— t_2 时刻示波器测量的波形幅值数据, V;

$f_m(t_x)$ —— t_x 时刻示波器测量的波形幅值数据, V。

b) 计算脉冲发生器输出的类冲激波形数据中时序数据的时间窗长度 T_s , 计算示波器测量的类冲激波形数据中时序数据的时间窗长度 T_m 。以 T_s 为时间窗长度调整幅值数据 $f_m(t)$, 调整方法如下:

当 $T_s < T_m$ 时, 按 T_s 时长截取幅值数据 $f_m(t)$ (应包含主峰波形和反射波形);

当 $T_s > T_m$ 时, 对幅值数据 $f_m(t)$ 做补零处理或补噪声处理。

c) 将以上数据处理后的 $f_s(t)$ 和 $f_m(t)$ 的波形数据做快速傅里叶变换 (FFT) 运算, 得到 $f_s(t)$ 的幅频响应 $A_s(\omega)$ 和相频响应 $\varphi_s(\omega)$ 、 $f_m(t)$ 的幅频响应 $A_m(\omega)$ 和相频响应 $\varphi_m(\omega)$ 。

d) 对幅频响应做除法运算, 即 $A_m(\omega)/A_s(\omega)$, 得到示波器幅频响应 $A_h(\omega)$; 对相频响应做除法运算, 即 $\varphi_m(\omega)/\varphi_s(\omega)$, 得到示波器相频响应 $\varphi_h(\omega)$ 。

e) 整合示波器幅频响应 $A_h(\omega)$ 和相频响应 $\varphi_h(\omega)$, 做快速反傅里叶变换 (IFFT) 运算, 得到示波器系统传递函数 $f_h(t)$ 。

附录 D 动态有效位

1. 时域法

设置测量通道的量程。设定通道采集速率 v_0 为最高, 采样间隔 $\tau=1/v_0$ 。设置通道采集数据个数 $n \geq 1000$ 。

按式(D.1)选取输入信号频率 f 。

$$f = N \cdot v_0 / n \quad (D.1)$$

式中:

v_0 ——通道采集速率标称值, Sa/s;

n ——通道采集的数据个数;

N ——通道采集的 n 个数据中所含信号整周期个数, N 与 n 不能有公因子。

选取输入正弦信号峰值约为覆盖量程 95% 的幅度值(一般为量程的 90%~100%之间); 调整被校数字示波器触发, 使信号稳定显示。调节直流偏置, 使输入信号居中覆盖通道测量范围。采集(2 个以上信号周期的)数据 $x_i (i=0, \dots, n-1)$, 输入计算机。按最小二乘法式(D.2)求出最佳拟合正弦信号:

$$a(i) = E \cdot \sin(\omega i + \theta) + d \quad (D.2)$$

式中:

$a(i)$ ——拟合信号的瞬时值, V;

E ——拟合正弦信号的幅度, V;

θ ——拟合正弦信号的初始相位, rad;

d ——拟合信号的直流分量值(直流偏置实测值), V;

ω ——拟合正弦信号的离散角频率($2\pi \cdot f \cdot \tau$), rad;

τ ——采样时间间隔, s。

按式(D.3)计算噪声与失真均方根值 NAD :

$$NAD = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=0}^{n-1} (x_i - a(i))^2} \quad (D.3)$$

按式(D.4)计算被校数字示波器通道的动态有效位数 $ENOB$, 记录结果:

$$ENOB = \log_2 \frac{FSR}{\sqrt{12} NAD} \quad (D.4)$$

式中:

FSR ——示波器通道量程, V。

2. 频域法

根据 IEEE Std 1057 中动态有效位数 (ENOB) 的解释, 对于给定频率和振幅的输入正弦波, 若理想示波器的均方根量化误差等于被测示波器的噪声与失真均方根 (NAD), 则此理想示波器的比特位数为 $ENOB$ 。可由下式计算:

$$ENOB = \frac{SINAD - 10 \log_{10} 1.5}{20 \log_{10} 2} - \log_2 \frac{2\sqrt{2}A_{rms}}{FSR} \quad (D.5)$$

式中:

$ENOB$ —— 被校数字示波器通道的动态有效位数, bit;

$SINAD$ —— 输入信号对噪声与失真之比, dB;

A_{rms} —— 波形的均方根值, V;

FSR —— 示波器通道量程, V。

按校准方法 7.10 连接设备并采集数据 $x_i(i=0, \dots, n-1)$, 为避免频谱泄露, 采集波形应为整数个波形周期;

对波形去除直流分量, 按公式 (D.6) 计算,

$$y_i = x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} x_i \quad (D.6)$$

式中:

y_i —— 去直流分量波形第 i 个采样点的值, V;

x_i —— 波形第 i 个采样点的值, V;

n —— 采样点数。

按公式 (D.7) 计算波形的均方根值 A_{rms} :

$$A_{rms} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} y_i^2} \quad (D.7)$$

式中:

A_{rms} —— 信号的均方根值, V;

y_i —— 去直流分量波形第 i 个采样点的值, V;

n —— 采样点数。

按公式 (D.8) 计算信号总功率 P_{total} ,

$$P_{total} = \frac{A_{rms}^2}{R} \quad (D.8)$$

式中:

P_{total} —— 信号总功率, dB;

A_{rms} —— 信号的均方根值, V;

R —— 负载阻抗, Ω 。

按式 (D.9) 对时域采样波形进行离散傅里叶变换 (DFT),

$$Y[k] = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} y_i \cdot e^{-\frac{j2\pi ki}{n}}, \quad k = 0, 1, \dots, n-1 \quad (D.9)$$

式中:

k —— 频域数据的索引;

y_i —— 去直流分量波形第 i 个采样点的值, V;

n —— 采样点数。

设信号主峰值频率 f_{signal} 为 DFT 频谱图的功率最大值所对应频率, 按公式 (D.10) 计算信号功率,

$$P_{\text{signal}} = \sum_{k=k_{\text{signal}}-\Delta k}^{k_{\text{signal}}+\Delta k} |Y[k]|^2 / R \quad (\text{D.10})$$

式中:

P_{signal} ——信号功率, dB;

Δk ——主瓣范围的索引值跨度;

k_{signal} ——主信号峰值对应的索引位置;

R ——负载阻抗, Ω 。

按式 (D.11) 计算信号对噪声和失真之比,

$$\text{SINAD} = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_{\text{signal}}}{P_{\text{total}} - P_{\text{signal}}} \quad (\text{D.11})$$

式中:

P_{signal} ——信号功率, dB;

P_{total} ——总功率, dB;

将式 (D.11) 计算结果代入式 (D.5) 计算 ENOB。

3. 方法来源

ENOB 计算公式 D.4 见 IEEE Std 1057 中式(78)。方法 1 时域法来源于 JJF 1057-1998 中 19.1 动态有效位数, 方法 2 频域法来源于 IEEE Std 1057 中 8.5.2 Test method for ENOB。

附录 E 测量不确定度评定示例

1. 直流增益不确定度评定（方波法）

1.1 测量方法

按校准规范中 7.3.1 方波法连接仪器并实现校准测量，可知不确定度分量主要来源于示波器校准仪和示波器相关测量指标。

1.2 测量模型

按校准规范中 7.3.1 测量方法可知测量模型如式（1.1）所示。

$$G = \frac{U_r}{U} \quad (1.1)$$

式中：

G ——直流增益测量值，无单位；

U_r ——方波电压信号幅度测量值，V；

U ——方波电压信号幅度输出值，V；

灵敏系数为： $c_1 = \frac{\partial G}{\partial U_r} = \frac{1}{U}$, $c_2 = \frac{\partial G}{\partial U} = \frac{U_r}{U^2}$

1.3 不确定度来源

a) 示波器测量 U_r 电平的测量重复性引入的不确定度 u_1 ；

b) 示波器校准仪方波电压误差引入的不确定度 u_2 ；

1.4 标准不确定度评定

a) 示波器测量 U_r 电平重复性引入不确定度

按 A 类方法评定测量重复性引入的不确定度。以示波器测量 300mV 电平为例，共测量 10 次，测量结果如表 1.1 所示。10 次测量的电压平均值为 299.26mV，按贝塞尔公式计算单次测量结果标准偏差为 0.015mV，即示波器测量重复性引入不确定度 $u_1=0.015\text{mV}$ 。

表 1.1 示波器测量 300mV 电平数据

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值 (mV)	299.24	299.26	299.26	299.25	299.23	299.26	299.28	299.24	299.26	299.27

b) 示波器校准仪方波电压误差引入的不确定度

示波器校准仪直流电平误差引入的不确定度

以示波器垂直刻度设置为 50mV/div 为例，全量程为 400mV，直流偏置为 0mV，则全量程 80%电平为 300mV。根据示波器校准仪 Fluke 9500B 指标手册可知，50Ω阻抗的

方波电压最大允许误差为 $\pm(0.1\% \text{输出} + 10\mu\text{V})$ ，则输出 300mV 直流电压的误差为 $\pm 0.31\text{mV}$ ，按均匀分布取 $k=\sqrt{3}$ ，标准不确定度分量范围为 $(18.04\sim 68.56)\mu\text{V}$ ，则示波器校准仪直流电平误差引入的不确定度 $u_2=0.179\text{mV}$ 。

1.5 合成相对标准不确定度

各标准不确定度分量汇总见表 1.2。

表 1.2 直流电压测量的标准不确定度分量一览表

来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度		灵敏系数 c_i $i=1, 2$	标准不确定度分量
				符号	数值		
示波器测量重复性	A	——	——	u_1	0.015mV	0.0033	0.00005
示波器校准仪直流电平误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	u_2	0.179mV	0.0033	0.000591

以上各标准不确定度分量不相关，则合成相对标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{(c_1 u_1)^2 + (c_2 u_2)^2} = 0.00060$$

1.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为 $U=k \cdot u_c=0.0012$ 。

2. 直流偏置

2.1 测量方法

按校准规范中 7.4 直流偏置校准方法连接仪器并实现校准测量，可知不确定度分量主要来源于示波器校准仪和示波器相关测量指标。

2.2 测量模型

按校准规范中 7.4 中计算直流偏置公式可知，直流偏置误差 ΔD 如式 (2.1) 所示。

$$\Delta D = U_x - U_0 \quad (2.1)$$

式中：

ΔD ——示波器的直流偏置误差，V；

U_x ——示波器测量的直流电压波形幅度值，V；

U_0 ——示波器校准仪输出的直流电压，V；

灵敏系数为：

$$c_1 = 1, c_2 = -1$$

2.3 不确定度来源

a) 示波器校准仪直流电平误差引入的不确定度 u_1 ；

b) 示波器测量重复性引入的不确定度 u_2 ；

2.4 标准不确定度评定

a) 示波器校准仪直流电平误差引入的不确定度

以数字示波器垂直刻度设置为50mV/div为例,全量程为400mV,直流偏置为200mV,示波器校准仪 50Ω阻抗的直流电压最大允许误差为±(0.25%输出+25 μ V), 则输出200mV 直流电压的误差为±0.075mV, 按均匀分布取 $k=\sqrt{3}$, 标准不确定度分量为 $u_1=0.075/\sqrt{3}=0.043\text{mV}$ 。

b) 示波器测量重复性引入不确定度

按 A 类方法评定测量重复性引入的不确定度。数字示波器测量直流电压 10 次, 测量结果如表 2.1 所示。10 次测量的电压平均值为 198.66mV, 按贝塞尔公式计算单次测量结果标准偏差为 0.016mV, 则测量重复性引入的不确定度为 $u_2=0.016\text{mV}$ 。

表 2.1 示波器测量直流电压数据

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值(mV)	198.68	198.65	198.66	198.68	198.67	198.66	198.64	198.67	198.65	198.69

2.5 合成相对标准不确定度

各标准不确定度分量汇总见表 2.1。

表 2.1 直流偏置测量的标准不确定度分量一览表

来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度		灵敏系数 c_i $i=1, 2, 3$	标准不确定度分量
				符号	数值		
示波器校准仪直流电平误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	u_1	0.043mV	1	0.043mV
示波器测量重复性	A	——	——	u_2	0.016mV	-1	0.016mV

以上各标准不确定度分量不相关, 则合成相对标准不确定度为

$$u_{cr} = \sqrt{(c_1u_1)^2 + (c_2u_2)^2} = 0.046\text{mV}$$

2.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$, 扩展不确定度为 $U_r=k\cdot u_{cr}=2\times 0.046=0.10\text{mV}$ 。

3 频带宽度

3.1 测量方法

按校准规范中 7.5.1 频带宽度校准方法连接仪器并实现校准测量, 可知不确定度分量主要来源于功率计、功分器和示波器相关测量指标。

3.2 测量模型

按校准规范中 7.5.1.4 中计算频率响应公式可知, 频率响应的计算模型如式 (3.1) 所示。

$$f_{BW} = 20 \lg \frac{U_i}{U_0} + P_o - P_i \quad (3.1)$$

式中:

f_{BW} ——示波器在 f 频率点的频率响应, dB;

U_i ——示波器测量频率 f 点的波形幅度值, V;

U_0 ——示波器测量频率 50MHz 点的波形幅度值, V;

P_i ——功率计测量频率 f 点的功率值, dBm;

P_0 ——功率计测量频率 50MHz 点的功率值, dBm。

在扫频方式测量频率响应过程中, 功率计测量不准、失配、功分器不平衡等皆是引入不确定度的分量, 综合考虑公式 (3.1) 和不确定度分量的影响, 测量模型可由公式 (3.2) 表示。

$$f_{BW} = \frac{U_i^2 M_{osc,i}}{U_0^2 M_{osc,0}} \cdot \frac{P_0 M_{pm,0} K_i}{P_i M_{pm,i} K_0} \cdot \frac{B_0}{B_i} \quad (3.2)$$

式中:

f_{BW} ——示波器频率 f 点处的频率响应, dB;

U_i ——示波器测量频率 f 点的波形幅度值, V;

U_0 ——示波器测量频率 50MHz 点的波形幅度值, V;

P_i ——功率计测量频率 f 点的功率值, dBm;

P_0 ——功率计测量频率为 50MHz 点的功率值, dBm;

$M_{osc,i}$ ——示波器在频率 f_i 点的失配因子, 无单位;

$M_{osc,0}$ ——示波器在频率 50MHz 点的失配因子, 无单位;

$M_{pm,i}$ ——功率计在频率 f_i 点的失配因子, 无单位;

$M_{pm,0}$ ——功率计在频率 50MHz 点的失配因子, 无单位;

K_i ——功率计在频率 f_i 点的校准因子, 无单位;

K_0 ——功率计在频率 50MHz 点的校准因子, 无单位;

B_i ——功分器在频率 f_i 点的不平衡, 无单位;

B_0 ——功率计在频率 50MHz 点的不平衡, 无单位;

灵敏系数:

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{\partial FR(f_i)}{\partial U_i} = \frac{2U_i M_{osc,i}}{U_0^2 M_{osc,0}} \cdot \frac{P_0 M_{pm,0} K_i}{P_i M_{pm,i} K_0} \cdot \frac{B_0}{B_i}, \quad c_2 = \frac{\partial FR(f_i)}{\partial U_0} = \frac{-2U_i^2 M_{osc,i}}{U_0^3 M_{osc,0}} \cdot \frac{P_0 M_{pm,0} K_i}{P_i M_{pm,i} K_0} \cdot \frac{B_0}{B_i} \\ c_3 &= \frac{\partial FR(f_i)}{\partial P_i}, \quad c_4 = \frac{\partial FR(f_i)}{\partial P_0}, \quad c_5 = \frac{\partial FR(f_i)}{\partial M_{osc,i}}, \quad c_6 = \frac{\partial FR(f_i)}{\partial M_{osc,0}}, \quad c_7 = \frac{\partial FR(f_i)}{\partial M_{pm,i}} \\ c_8 &= \frac{\partial FR(f_i)}{\partial M_{pm,0}}, \quad c_9 = \frac{\partial FR(f_i)}{\partial K_i}, \quad c_{10} = \frac{\partial FR(f_i)}{\partial K_0}, \quad c_{11} = \frac{\partial FR(f_i)}{\partial B_i}, \quad c_{12} = \frac{\partial FR(f_i)}{\partial B_0} \end{aligned}$$

3.3 不确定度来源

- a) 示波器测量频率 f 点波形幅度值的测量重复性引入的不确定度 u_1 ;
- b) 示波器测量频率 50MHz 点波形幅度值的测量重复性引入的不确定度 u_2 ;
- c) 功率计测量频率 f 点功率值的测量重复性引入不确定度 u_3 ;
- d) 功率计测量频率 50MHz 点功率值的测量重复性引入的不确定度 u_4 ;
- e) 示波器测量频率 f 点失配引入不确定度 u_5 ;
- f) 示波器测量频率 50MHz 点失配引入不确定度 u_6 ;
- g) 功率计测量频率 f 点失配引入不确定度 u_7 ;
- h) 功率计测量频率 50MHz 点失配引入不确定度 u_8 ;
- i) 功率计测量频率 f 点功率不准引入不确定度 u_9 ;
- j) 功率计测量频率 50MHz 点功率不准引入不确定度 u_{10} ;
- k) 功分器在频率 f 点分配不平衡引入不确定度 u_{11} ;
- l) 功分器在频率 50MHz 点分配不平衡引入不确定度 u_{12} 。

3.4 标准不确定度评定

- a) 示波器测量频率 f 点波形幅度值的测量重复性引入的不确定度

以 50GHz 频率点为例，按 A 类方法评定测量重复性引入的不确定度。示波器测量正弦波幅度 10 次，测量结果如表 3.1 所示，10 次测量平均值为 216.6mV，按贝塞尔公式计算单次测量结果标准偏差为 0.97mV，则测量重复性引入的不确定度为 $u_1=0.97\text{mV}$ 。

表 3.1 示波器测量 50GHz 波形幅度数据

测量次数	幅度测量值(mV)
1	216.4
2	217.2
3	215.6
4	216.8
5	215.1
6	217.4
7	218.2
8	216.7
9	215.5
10	217.2
$\bar{Y}$	216.6
$s(Y_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n Y_i - \bar{Y}}{(n-1)}}$	0.97

- b) 示波器测量频率 50MHz 点波形幅度值的测量重复性引入的不确定度

按 A 类方法评定测量重复性引入的不确定度。示波器测量 50MHz 正弦波幅度

10 次，测量结果如表 3.2 所示，10 次测量平均值为 636.9mV，按贝塞尔公式计算单次测量结果标准偏差为 1.73mV，则测量重复性引入的不确定度为 $u_2=1.73\text{mV}$ 。

表 3.2 示波器测量 50MHz 波形幅度数据

测量次数	幅度测量值(mV)
1	638.8
2	636.4
3	638.2
4	639.5
5	637.6
6	635.9
7	634.4
8	636.5
9	637.2
10	634.3
$\bar{Y}$	636.9
$s(Y_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n Y_i - \bar{Y}}{(n-1)}}$	1.73

c) 功率计测量频率 f_i 点功率值的测量重复性引入不确定度

以 50GHz 频率点为例，按 A 类方法评定测量重复性引入的不确定度。功率计测量正弦波幅度 10 次，测量结果如表 3.3 所示。10 次功率测量平均值为-7.07dBm，转化为 W 单位为 $1.965 \times 10^{-4}\text{W}$ ，按贝塞尔公式计算单次测量结果标准偏差为 $6.048 \times 10^{-7}\text{W}$ ，则测量重复性引入的不确定度为 $u_3=6.048 \times 10^{-7}\text{W}$ 。

表 3.3 功率计测量 50GHz 信号功率数据

测量次数	功率值(dBm)	功率值(W)
1	-7.06	1.968E-04
2	-7.08	1.959E-04
3	-7.07	1.963E-04
4	-7.05	1.972E-04
5	-7.06	1.968E-04
6	-7.08	1.959E-04
7	-7.09	1.954E-04
8	-7.06	1.968E-04
9	-7.07	1.963E-04
10	-7.05	1.972E-04
$\bar{Y}$	-7.067	1.965E-04

$s(Y_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n Y_i - \bar{Y}}{(n-1)}}$	0.013	6.048E-07
--	-------	-----------

d) 功率计测量频率 50MHz 点功率值的测量重复性引入的不确定度

按 A 类方法评定测量重复性引入的不确定度。功率计测量正弦波幅度 10 次，测量结果如表 3.4 所示。10 次功率测量平均值为 0.04dBm，转化为 W 单位为 $1.009 \times 10^{-3} \text{W}$ ，按贝塞尔公式计算单次测量结果标准偏差为 $1.715 \times 10^{-6} \text{W}$ ，则测量重复性引入的不确定度为 $u_4 = 1.715 \times 10^{-6} \text{W}$ 。

表 3.4 功率计测量 50MHz 信号功率数据

测量次数	功率值(dBm)	功率值(W)
1	0.05	1.012E-03
2	0.04	1.009E-03
3	0.04	1.009E-03
4	0.03	1.007E-03
5	0.03	1.007E-03
6	0.04	1.009E-03
7	0.05	1.012E-03
8	0.04	1.009E-03
9	0.03	1.007E-03
10	0.04	1.009E-03
$\bar{Y}$	0.04	1.009E-03
$s(Y_i) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n Y_i - \bar{Y}}{(n-1)}}$	0.0074	1.715E-06

e) 示波器测量频率 f_i 点失配引入不确定度

网络分析仪实测 50GHz 频点功分器端口驻波比 VSWR 为 1.28，示波器的 50GHz 频点 VSWR 为 1.65，根据公式 (3.3) 分别计算功分器端口反射系数模值 $|\Gamma_s| = 0.12$ 和示波器反射系数模值 $|\Gamma_o| = 0.25$ 。

$$VSWR = \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} \quad (3.3)$$

式中，

VSWR——电压驻波比，无量纲；

Γ ——反射系数，无量纲。

示波器与功分器连接端口间的失配可根据公式 (3.4) 计算。

$$M_{osc} = \frac{(1 - |\Gamma_s|^2)(1 - |\Gamma_o|^2)}{|1 - \Gamma_s \Gamma_o|^2} \quad (3.4)$$

式中,

M_{osc} ——示波器与功分器连接端口间的失配, 无量纲;

Γ_s ——功分器端口反射系数, 无量纲;

Γ_o ——示波器端口反射系数, 无量纲。

由式 (3.4) 可知, 若将失配 M_{osc} 估算为 1 则引入的最大误差为 $2|\Gamma_s||\Gamma_o|$ 。按照 B 类不确定度评定方法, 由于反射系数符合反正弦分布, 包含因子 $k=\sqrt{2}$, 可根据公式 (3.5) 计算失配引入的不确定度分量 $u_5=0.042$ 。

$$u_5 = \frac{2|\Gamma_s||\Gamma_o|}{\sqrt{2}} \quad (3.5)$$

式中,

u_5 ——示波器测量频率 f_i 点失配引入不确定度分量, 无量纲;

Γ_s ——功分器端口反射系数, 无量纲;

Γ_o ——示波器端口反射系数, 无量纲。

f) 示波器测量频率 50MHz 点失配引入不确定度

网络分析仪实测 50MHz 频点功分器端口驻波比 VSWR 为 1.02, 示波器的 50MHz 频点 VSWR 为 1.24, 根据公式 (3.3) 分别计算功分器端口反射系数模值 $|\Gamma_s|=0.01$ 和示波器反射系数模值 $|\Gamma_o|=0.11$ 。

按照 B 类不确定度评定方法, 反射系数符合反正弦分布, 包含因子 $k=\sqrt{2}$, 根据公式 (3.5) 计算失配引入的不确定度分量 $u_6=1.6 \times 10^{-3}$ 。

g) 功率计测量频率 f_i 点失配引入不确定度

网络分析仪实测 50GHz 频点功分器端口驻波比 VSWR 为 1.28, 功率计 50GHz 频点的驻波比由溯源证书给出为 1.086, 根据公式 (3.3) 分别计算功分器端口反射系数模值 $|\Gamma_s|=0.12$ 和功率计反射系数模值 $|\Gamma_p|=0.04$ 。

按照 B 类不确定度评定方法, 反射系数符合反正弦分布, 包含因子 $k=\sqrt{2}$, 根据公式 (3.5) 计算失配引入的不确定度分量 $u_7=6.8 \times 10^{-3}$ 。

h) 功率计测量频率 50MHz 点失配引入不确定度

网络分析仪实测 50MHz 频点功分器端口驻波比 VSWR 为 1.02, 功率计 50MHz 频点的驻波比由溯源证书给出为 1.004, 根据公式 (3.3) 分别计算功分器端口反射系数模值 $|\Gamma_s|=0.01$ 和功率计反射系数模值 $|\Gamma_p|=0.002$ 。

按照 B 类不确定度评定方法，反射系数符合反正弦分布，包含因子 $k=\sqrt{2}$ ，根据公式（3.5）计算失配引入的不确定度分量 $u_8=2.8\times 10^{-5}$ 。

i) 功率计测量频率 f 点功率不准引入不确定度

按照 B 类不确定度评定方法，根据功率计溯源证书的校准数据，50GHz 频点校准因子为 99.87%，不确定度为 1.16%，包含因子为 2。则 50GHz 频点功率测量不准引入的标准不确定度分量 $u_9=1.16\%/2=5.8\times 10^{-3}$ 。

j) 功率计测量频率 50MHz 点功率不准引入不确定度

按照 B 类不确定度评定方法，根据功率计溯源证书的校准数据，50MHz 频点校准因子为 99.96%，不确定度为 0.71%，包含因子为 2。则 50MHz 频点功率测量不准引入的标准不确定度分量 $u_{10}=0.71\%/2=3.6\times 10^{-3}$ 。

k) 功分器在频率 f 点分配不平衡引入不确定度

网络分析仪实测 50GHz 频点功分器两输出端口不平衡为 0.08dB，则两端口不平衡造成的功率比为 1.019。按照 B 类不确定度评定方法，包含因子为 $\sqrt{3}$ ，则 50GHz 频点功分器两输出端口不平衡引入的标准不确定度分量 $u_{11}=1.019/\sqrt{3}=0.588$ 。

l) 功分器在频率 50MHz 点分配不平衡引入不确定度

网络分析仪实测 50MHz 频点功分器两输出端口不平衡为 0.02dB，则两端口不平衡造成的功率比为 1.0046。按照 B 类不确定度评定方法，包含因子为 $\sqrt{3}$ ，则 50MHz 频点功分器两输出端口不平衡引入的标准不确定度分量 $u_{12}=1.0046/\sqrt{3}=0.580$ 。

3.5 合成标准不确定度

各标准不确定度分量汇总见表 3.5。

表 3.5 频率响应测量的标准不确定度分量一览表

来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度		灵敏系数 c_i $i=1, 2, \dots,$ 12	标准不确定度分量
				符号	数值		
示波器测量频率为 f_i 的波形幅度值的测量重复性	A	——	——	u_1	0.97mV	5.367 (1/mV)	5.2×10^{-3}
示波器测量频	A	——	——	u_2	1.73mV	-1.826	3.2×10^{-3}

率为50MHz的 波形幅度值的 测量重复性						(1/mV)	
功率计测量频率为 f_i 信号功率的测量重复性	A	——	——	u_3	$6.048 \times 10^{-7} \text{W}$	-2.97×10^3 (1/W)	1.8×10^{-3}
功率计测量频率为50MHz信号功率的测量重复性	A	——	——	u_4	$1.715 \times 10^{-6} \text{W}$	576.1 (1/W)	9.9×10^{-4}
示波器测量频率 f_i 点失配引入不确定度	B	反正弦	$\sqrt{2}$	u_5	0.042	0.581	0.0249
示波器测量频率50MHz点失配引入不确定度	B	反正弦	$\sqrt{2}$	u_6	1.6×10^{-3}	-0.581	9.1×10^{-4}
功率计测量频率 f_i 点失配引入不确定度	B	反正弦	$\sqrt{2}$	u_7	6.8×10^{-3}	-0.581	4.0×10^{-3}
功率计测量频率50MHz点失配引入不确定度	B	反正弦	$\sqrt{2}$	u_8	2.8×10^{-5}	0.581	1.7×10^{-5}
功率计测量频率 f_i 点功率不准引入不确定度	B	正态	2	u_9	5.8×10^{-3}	0.582	3.4×10^{-3}
功率计测量频率50MHz点功率不准引入不	B	正态	2	u_{10}	3.6×10^{-3}	-0.582	2.1×10^{-3}

确定度							
功分器在频率 f_i 点分配不平衡引入不 确定度	B	均匀	$\sqrt{3}$	u_{11}	0.588	-0.576	0.339
功分器在频率 50MHz 点分配 不平衡引入不 确定度	B	均匀	$\sqrt{3}$	u_{12}	0.580	0.584	0.339

由于 50GHz 和 50MHz 两频率点皆由同一功率计测量，功率计测量不准引入的不确定度分量 u_9 和 u_{10} 之间存在相关性，其他标准不确定度分量间则不相关，合成标准不确定度 u_c 可由下式计算。

$$u_c = \sqrt{(c_1 u_1)^2 + \dots + (c_{12} u_{12})^2 + 2c_9 c_{10} u_9 u_{10}} = 0.48$$

3.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为 $U=k \cdot u_c=0.96$ 。

转换为对数单位的扩展不确定度为 0.18dB ($k=2$)。

4 上升时间（标准快沿法）

4.1 测量方法

按校准规范中 7.6.1 上升时间校准方法连接仪器并实现校准测量，可知不确定度分量主要来源于标准快沿信号和示波器相关测量指标。

4.2 测量模型

按校准规范中 7.6.1 校准方法可知，标准快沿测量上升时间的测量模型如式（4.1）所示。

$$t_r = \sqrt{t_{rm}^2 - t_{rs}^2} \quad (4.1)$$

式中：

t_r ——示波器上升时间，s；

t_{rm} ——示波器测量的上升时间，s；

t_{rs} ——快沿发生器输出的类阶跃脉冲上升时间，s。

$$\text{灵敏系数为：} c_1 = \frac{\partial t_r}{\partial t_{rs}} = \frac{-t_{rs}}{\sqrt{t_{rm}^2 - t_{rs}^2}}, \quad c_2 = \frac{\partial t_r}{\partial t_{rm}} = \frac{t_{rm}}{\sqrt{t_{rm}^2 - t_{rs}^2}}$$

4.3 不确定度来源

a) 标准脉冲信号引入的不确定度 u_1 ；

- b) 测量重复性引入的不确定度 u_2 ;
- c) 示波器时间间隔测量误差引入的不确定度 u_3 ;
- d) 示波器幅度测量误差引入不确定度 u_4 ;
- e) 示波器建立时间与标准快沿比率引入不确定度 u_5 ;

4.4 标准不确定度评定

a) 标准脉冲信号引入的不确定度

以快沿脉冲信号发生器为例, 其溯源证书中上升时间测量结果为 7.5ps, 不确定度为 1.5ps ($k=2$), 则标准脉冲信号上升时间引入的标准不确定度为 $u_1=1.5/2=0.75\text{ps}$ 。

b) 测量重复性引入的不确定度

按 A 类方法评定测量重复性引入的不确定度。示波器测量标准脉冲信号上升时间 10 次, 测量结果如表 4.1 所示。10 次测量的上升时间平均值为 18.27ps, 按贝塞尔公式计算单次测量结果标准偏差为 0.24ps, 则测量重复性引入的不确定度为 $u_2=0.24\text{ps}$ 。

表 4.1 上升时间测量数据

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值(ps)	18.42	18.16	17.86	18.55	18.31	18.12	17.95	18.53	18.47	18.36

c) 示波器时间间隔测量误差引入的不确定度

依据被测示波器指标手册, 时间间隔测量误差为 $\pm(1\text{ps}+0.25\%\times\text{时间间隔读数})$, 其中已包含时基抖动的误差分量。若示波器测量上升时间为 18.3ps, 则时间间隔测量误差为 $\pm 1.05\text{ps}$, 其变化大致服从均匀分布, 取 $k=\sqrt{3}$, 因此由示波器时间间隔测量误差引入的不确定度为 $u_3=1.05\text{ps}/\sqrt{3}=0.61\text{ps}$ 。

d) 示波器幅度测量误差引入不确定度

依据被测示波器指标手册, 直流增益最大允许误差为 $\pm[0.4\%\times\text{量程}+2\text{mV}\pm 0.6\%\times(\text{电压读数}-\text{直流偏置电压})]$, 垂直刻度设置为 100mV/div, 量程为 800mV, 测量脉冲幅度为 500mV, 直流偏置电压为 250mV, 顶量电压 500mV, 则电压测量误差为 $\pm 6.7\text{mV}$, 按均匀分布取 $k=\sqrt{3}$, 引入的标准不确定度分量为 3.87mV; 底量电压 0mV, 则电压测量误差为 $\pm 6.7\text{mV}$, 按均匀分布取 $k=\sqrt{3}$, 引入的标准不确定度分量为 3.87mV。由于脉冲幅度由高低两电平差值, 则幅度测量误差引入的标准不确定度分量为 $\sqrt{3.87^2 + 3.87^2} = 5.47\text{mV}$ 。

将幅度测量误差引入的标准不确定度分量转化为对时间间隔测量的影响, 按脉冲幅度 500mV 和上升时间 20ps 比例计算, 当幅度测量误差引入的标准不确定度分量为

5.47mV 时，对时间间隔测量引入的标准不确定度分量为 $u_4=5.47\text{mV} \times 20\text{ps}/500\text{mV}=0.22\text{ps}$ 。

e) 示波器建立时间与标准快沿比率引入的不确定度

示波器建立时间根据示波器技术指标为 22ps，快沿信号的上升时间是其 1/3，根据资料显示此时误差为 5.4%，按照均匀分布，取 $k=\sqrt{3}$ ，因此由示波器建立时间与标准快沿比率引入的不确定度为 $u_5=0.99\text{ps}/\sqrt{3}=0.57\text{ps}$ 。

4.5 合成标准不确定度

各标准不确定度分量汇总见表 4.2。

表 4.2 上升时间测量的标准不确定度分量一览表

来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度		灵敏系数 c_i $i=1, 2, \dots, 4$	标准不确定 度分量
				符号	数值		
标准脉冲信号	B	正态	2	u_1	0.75ps	0.45	0.34ps
测量重复性	A	——	——	u_2	0.24ps	1.10	0.26ps
示波器时间间隔测量误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	u_3	0.61ps	1.00	0.61ps
示波器幅度测量误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	u_4	0.22ps	1.00	0.22ps
示波器建立时间与标准快沿比率误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	U_5	0.57ps	1.00	0.57ps

以上各标准不确定度分量不相关，则合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{(c_1u_1)^2 + (c_2u_2)^2 + (c_3u_3)^2 + (c_4u_4)^2 + (c_5u_5)^2} = 0.9\text{ps}$$

4.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为 $U=k \cdot u_c=1.8\text{ps}$ 。

5 本底噪声

5.1 测量方法

按校准规范中 7.7 本底噪声校准方法连接仪器并实现校准测量，可知不确定度分量主要来源于示波器相关测量指标。

5.2 测量模型

直接读取示波器测量的本底噪声值，测量模型如式（5.1）所示。

$$N = N_m$$

(5.1)

式中：

N ——示波器本底噪声，V；

N_m ——示波器本底噪声测量结果，V；

5.3 不确定度来源

a) 示波器本底噪声引入的不确定度 u_1 ；

b) 测量重复性引入的不确定度 u_2 ；

5.4 标准不确定度评定

a) 示波器本底噪声引入的不确定度

根据数字示波器指标手册可知，50GHz 带宽模式下本底噪声指标为±0.6mV，按均匀分布取 $k=\sqrt{3}$ ，则引入的标准不确定度为 $u_1=0.6\text{mV}/\sqrt{3}=0.35\text{mV}$ 。

b) 测量重复性引入的不确定度

按 A 类方法评定测量重复性引入的不确定度。示波器测量 10 次本底噪声，测量结果如表 5.1 所示，10 次本底噪声测量平均值为 0.66mV，按贝塞尔公式计算单次测量结果标准偏差为 0.10mV，则测量重复性引入的不确定度为 $u_2=0.10\text{mV}$ 。

表 5.1 示波器本底噪声测量数据

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值(mV)	0.68	0.54	0.73	0.87	0.66	0.52	0.71	0.58	0.65	0.70

5.5 合成标准不确定度

各标准不确定度分量汇总见表 5.2。

表 5.2 本底噪声测量的标准不确定度分量一览表

来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度		灵敏系数 c_i $i=1, 2$	标准不确定度分量
				符号	数值		
示波器本底噪声	B	均匀	$\sqrt{3}$	u_1	0.35mV	1	0.35mV
测量重复性	A	——	——	u_2	0.10mV	1	0.10mV

以上各标准不确定度分量不相关，则合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{(c_1u_1)^2 + (c_2u_2)^2} = 0.36 \text{ mV}$$

5.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为 $U=k\cdot u_c=0.72 \text{ mV}$ 。

6 通道隔离度

6.1 测量方法

按校准规范中 7.8 通道隔离度校准方法连接仪器并实现校准测量，可知不确定度分量主要来源于示波器校准仪和示波器相关测量指标。

6.2 测量模型

读取示波器测量的被干扰通道幅度值和干扰通道幅值，测量模型如式 (6.1) 所示。

$$I = \frac{U_b}{U_a} \quad (6.1)$$

式中：

U_b ——干扰通道信号幅值，V；

U_a ——被干扰通道信号幅值，V；

I ——通道间隔离度；

6.3 不确定度来源

- a) 示波器干扰通道幅度测量不准引入的不确定度 u_1 ；
- b) 示波器被干扰通道幅度测量不准引入的不确定度 u_2 ；

6.4 标准不确定度评定

- a) 示波器干扰通道幅度读数不准引入的不确定度

以 59GHz 示波器最大垂直刻度设置为 1V/div 为例，全量程为 8V，直流偏置为 0mV，则全量程 80%电平为 6V。根据示波器指标手册可知，幅度测量准确度为 $\pm 1\%$ ，按均匀分布取 $k=\sqrt{3}$ ，则示波器测量脉冲幅度误差引入的不确定度 $u_1=1\%/\sqrt{3}=0.57\%$ 。

$$\text{灵敏系数 } C_a = -\frac{U_b}{U_a^2} = \frac{-0.46}{6000 \times 6000} = -1.28 \times 10^{-8}。$$

- b) 示波器被干扰通道幅度读数不准引入的不确定度

以 59GHz 示波器最大垂直刻度设置为 1mV/div 为例，全量程为 8mV，直流偏置为 0mV。根据示波器指标手册可知，幅度测量准确度为 $\pm 1.5\%$ ，按均匀分布取 $k=\sqrt{3}$ ，则示波器测量脉冲幅度误差引入的不确定度 $u_2=1.5\%/\sqrt{3}=0.87\%$ 。

$$\text{灵敏系数 } C_b = U_b = 0.46。$$

6.5 合成标准不确定度

各标准不确定度分量汇总见表 6.1。

表 6.1 隔离度测量的标准不确定度分量一览表

来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度	灵敏系数	标准不确定
----	------	----	-------	--------	------	-------

				符号	数值	c_i $i=1, 2$	度分量
示波器干扰通道幅度读数不准	B	均匀	$\sqrt{3}$	u_1	0.57%	-1.28×10^{-8}	-7.3×10^{-11}
示波器干扰通道幅度读数不准	B	均匀	$\sqrt{3}$	u_2	0.87%	0.46	4.0×10^{-3}

以上各标准不确定度分量强相关，所以相关系数为 1，则合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{(c_1 u_1)^2 + (c_2 u_2)^2 + 2 c_1 c_2 u_1 u_2} = 3.48 \times 10^{-5}$$

6.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为 $U=k \cdot u_c=7 \times 10^{-5}$ 。

7 时基

7.1 测量方法

按校准规范中 7.9 时基抖动校准方法连接仪器并实现校准测量，可知不确定度分量主要来源于微波信号源和示波器相关测量指标。

7.2 测量模型

直接读取示波器测量的频率值，测量模型如式（7.1）所示。

$$f = f_0 + \Delta f_1 + \Delta f_2 + \Delta f_3 + \Delta f_4 \tag{7.1}$$

式中：

- f ——被测时基频率；
- f_0 ——频率计数器示值；
- Δf_1 ——测量重复性引入的误差；
- Δf_2 ——频率计数器参考频率引入的误差；
- Δf_3 ——频率计数器分辨力引入的误差；
- Δf_4 ——数据修约引入的误差；

7.3 不确定度来源

- a) 测量重复性引入的不确定度 u_1 ；
- b) 频率计数器引入不确定度 u_2 。
- c) 频率计数器分辨力引入的不确定度 u_3 ；
- d) 数据修约引入不确定度 u_4 。

7.4 标准不确定度评定

a) 测量重复性引入的不确定度

按照 A 类方法评定测量重复性引入的不确定度。频率计数器测量时基频率 10 次，测量结果如表 7.1 所示。10 次测电压平均值为 10.0000000527，按照贝塞尔公式计算单次测量结果标准偏差 $8.76 \times 10^{-9} \text{MHz}$ ，则测量重复性引入的不确定度为 $u_1 = 8.76 \times 10^{-10}$ 。

表 7.1 频率计数器测量时基频率数据

测量次数	1	2	3	4	5
测量值/MHz	10.000000052	10.000000054	10.000000054	10.000000054	10.000000054
测量次数	6	7	8	9	10
测量值/MHz	10.000000053	10.000000052	10.000000053	10.000000054	10.000000052

b) 频率计数器参考频率误差引入的不确定度

频率计参考晶振的频率相对最大允许误差为 $\pm 5 \times 10^{-10}$ ，按照均匀分布取 $k = \sqrt{3}$ ，标准不确定度分量为 $u_2 = 2.89 \times 10^{-10}$ 。

c) 频率计数器分辨力引入的不确定度

频率计数器测量 10MHz 时基频率信号时，分辨率为 0.001Hz，引入的相对量化误差为 $\pm 5 \times 10^{-11}$ ，按均匀分布取 $k = \sqrt{3}$ ，则频率计数器分辨率引入的相对标准不确定度分量 $u_3 = 2.89 \times 10^{-11}$ 。

d) 数据修约引入的不确定度

由于时基频率的测量值只取到 0.01Hz，所以由数据修约引入的相对量化误差为 $\pm 5 \times 10^{-10}$ ，按均匀分布取 $k = \sqrt{3}$ ，则频率计数器分辨率引入的相对标准不确定度分量 $u_4 = 2.89 \times 10^{-10}$ 。

7.5 合成标准不确定度

各标准不确定度分量汇总见表 7.2。

表 7.2 时基抖动测量的标准不确定度分量一览表

来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度		灵敏系数 c_i $i=1, 2$	标准不确定度 分量
				符号	数值		
测量重复性	A	--	--	u_1	8.76×10^{-10}	1	8.76×10^{-10}
频率计数器参考频率误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	u_2	2.89×10^{-10}	1	2.89×10^{-10}

频率计数器分辨力	B	均匀	$\sqrt{3}$	u_3	2.89×10^{-11}	1	2.89×10^{-11}
频率计数器分辨力	B	均匀	$\sqrt{3}$	u_4	2.89×10^{-10}	1	2.89×10^{-10}

以上各标准不确定度分量不相关，则合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = 9.67 \times 10^{-10}$$

7.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为 $U=k \cdot u_c=2.0 \times 10^{-9}$ 。

8 动态有效位

8.1 测量方法

按校准规范中 7.10 动态有效位时域法校准方法连接仪器并实现校准测量(如图 12)，可知不确定度分量主要来源于信号发生器和示波器相关测量指标。

8.2 测量模型

读取示波器测量的波形数据，计算测量模型如式 (8.1) 所示。

$$ENOB = \frac{SINAD - 10 \log_{10} 1.5}{20 \log_{10} 2} - \log_2 \frac{2\sqrt{2}A_{rms}}{FSR} \quad (8.1)$$

式中：

$ENOB$ —— 被校数字示波器通道的动态有效位数，bit；

$SINAD$ —— 输入信号对噪声与失真之比，dB；

A_{rms} —— 波形的均方根值，V；

FSR —— 示波器通道量程，V。

8.3 不确定度来源

由测量模型可知，测量不确定度主要来源于示波器测量的信号波形数据，以及各种算法对不确定度的传递和算法引入的不确定度。由于运算中涉及算法复杂，按传统的 GUM 法难以有效评定不确定度，在此采用蒙特卡洛法 (MCM) 评定动态有效位数的不确定度。

8.4 不确定度评定

采用蒙特卡洛法评定动态有效位数的不确定度，其中涉及相关算法，以程序按照运算流程实现各运算算法。

根据复杂模型不确定度评定方法《“测量不确定度表示指南”补充文件 1》(GUM Sup.1) 建议采用的 Monte Carlo 方法，确定样本容量 M 。由于波形数据量较大，按置信概率 p 为 0.95 考虑，确定样本容量 M 为 1×10^5 ，即进行不确定度计算的示波器波形数量为 1×10^5 。明确万里眼 80GHz 示波器测量 ENOB 参数相关的不确定度来源和特征参数等信息，详情见下表：

表 8.1 动态有效位数测量的标准不确定度分量一览表

来源	分布	特征参数
增益误差引入的不确定度	均匀	$\pm 1\%$
直流偏移误差引入的不确定度	均匀	$\pm 0.5\% \times \text{FS}$
垂直本底噪声引入的不确定度	均匀	$50\mu\text{V}$

根据 MCM 不确定度评定方法和以上运算算法, 形成 MCM 评定程序, 将上述不确定度来源加入到用于计算 ENOB 的示波器波形中, 带入到 ENOB 计算程序中, 得到样本数量 1×10^5 的计算结果, 对计算结果进行统计分析得到标准不确定度, 不确定度为 $u=0.02$ 。

因此动态有效位数的不确定度为 0.02。

9 校准信号

9.1 电压幅度的校准

9.1.1 测量方法

按校准规范中 7.11 校准信号电平校准方法连接仪器并实现校准测量, 可知不确定度分量主要来源于数字多用表和示波器相关测量指标。

9.1.2 测量模型

数字多用表直接测量直流电压值, 测量模型如式 (9.1) 所示。

$$L = L_m \quad (9.1)$$

式中:

L ——示波器校准信号电平, V;

L_m ——数字多用表测量结果, V;

9.1.3 不确定度来源

- 数字多用表直流电压测量引入的不确定度 u_1 ;
- 示波器测量重复性引入的不确定度 u_2 ;
- 50Ω 通过式负载阻抗不准引入的不确定度 u_3 。

9.1.4 标准不确定度评定

- 数字多用表直流电压测量引入的不确定度

根据数字多用表指标手册可知, 直流电压测量最大允许误差为 $\pm 1.0 \times 10^{-5}$, 按均匀分布取 $k=\sqrt{3}$, 则标准不确定度为 $u_1=1.0 \times 10^{-5} \times 2/\sqrt{3}=1.2 \times 10^{-5}\text{V}$ 。

b) 示波器测量重复性引入的不确定度

按 A 类方法评定测量重复性引入的不确定度。数字多用表测量 10 次电阻，测量结果如表 9.1 所示，10 次本底噪声测量平均值为 2.000968V，按贝塞尔公式计算单次测量结果标准偏差为 $1.4 \times 10^{-5} \text{V}$ ，则测量重复性引入的不确定度为 $u_2=1.4 \times 10^{-5} \text{V}$ 。

表 9.1 数字多用表电压测量数据

测量次数	测量值(V)
1	2.000968
2	2.000949
3	2.000959
4	2.000965
5	2.000986
6	2.000975
7	2.000954
8	2.000994
9	2.000966
10	2.000959

c) 50Ω通过式负载阻抗不准引入的不确定度

50Ω通过式负载阻抗最大允许误差为±0.1%，假设数字多用表和示波器均为 50Ω系统，由等效电路原理计算可知，电压测量引入误差小于 $1.0 \times 10^{-5} \text{V}$ ，按均匀分布取 $k=\sqrt{3}$ ，则标准不确定度为 $u_3=1.0 \times 10^{-5} / \sqrt{3}=5.8 \times 10^{-6} \text{V}$ 。

9.1.5 合成标准不确定度

各标准不确定度分量汇总见表 9.2。

表 9.2 校准信号电平测量的标准不确定度分量一览表

来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度		灵敏系数 c_i	标准不确定度分量
				符号	数值		
数字多用表直流电压测量	B	均匀	$\sqrt{3}$	u_1	$1.2 \times 10^{-5} \text{V}$	1	$1.2 \times 10^{-5} \text{V}$
示波器测量重复性	A	——	——	u_2	$1.4 \times 10^{-5} \text{V}$	1	$1.4 \times 10^{-5} \text{V}$
50Ω通过式负载阻抗不准	B	均匀	$\sqrt{3}$	u_3	$5.8 \times 10^{-6} \text{V}$	1	$5.8 \times 10^{-6} \text{V}$

以上各标准不确定度分量不相关，则合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{(c_1u_1)^2 + (c_2u_2)^2 + (c_3u_3)^2} = 1.93 \times 10^{-5} \text{ V}$$

9.1.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为 $U=k \cdot u_c=3.9 \times 10^{-5} \text{ V}$ 。

9.2 信号频率的校准

9.2.1 测量方法

按校准规范中 7.11 校准方波信号频率方法连接仪器并实现校准测量，可知不确定度分量主要来源于频率计和示波器相关测量指标。

9.2.2 测量模型

频率计直接测量频率值，测量模型如式（9.2）所示。

$$T = T_m \tag{9.2}$$

式中：

T ——校准信号频率，Hz；

T_m ——频率计测量结果，Hz；

9.2.3 不确定度来源

- a) 频率计测量引入的不确定度 u_1 ；
- b) 频率计测量重复性引入的不确定度 u_2 ；

9.2.4 标准不确定度评定

- a) 频率计测量引入的不确定度

根据频率计指标手册可知，频率测量相对最大允许误差为 $\pm 1.0 \times 10^{-7}$ ，按均匀分布取 $k=\sqrt{3}$ ，则标准不确定度为 $u_1=1.0 \times 10^{-7}/\sqrt{3}=0.57 \times 10^{-7}$ 。

- b) 频率计测量重复性引入的不确定度

按 A 类方法评定测量重复性引入的不确定度。频率计测量 10 次频率，测量结果如表 9.3 所示，10 次频率测量平均值为 1000.1Hz，按贝塞尔公式计算单次测量结果标准偏差为 0.0483Hz，则测量重复性引入的不确定度为 $u_2=0.0483\text{Hz}/1000.1\text{Hz}=4.82 \times 10^{-5}$ 。

表 9.3 数字多用表电压测量数据

测量次数	测量值(Hz)
1	1000.2
2	1000.1
3	1000.1
4	1000.1
5	1000.2
6	1000.2
7	1000.1
8	1000.1

9	1000.1
10	1000.1

9.2.5 合成标准不确定度

各标准不确定度分量汇总见表 9.4。

表 9.4 校准信号电平测量的标准不确定度分量一览表

来源	评定方法	分布	<i>k</i> 值	标准不确定度		灵敏系数 <i>c_i</i>	标准不确定度分量
				符号	数值		
频率计测量不准引入的不确定度	B	均匀	$\sqrt{3}$	<i>u</i> ₁	0.57×10^{-7}	1	0.57×10^{-7}
频率计测量重复性	A	——	——	<i>u</i> ₂	4.82×10^{-5}	1	4.82×10^{-5}

以上各标准不确定度分量不相关，则合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{(c_1u_1)^2 + (c_2u_2)^2} = 4.82 \times 10^{-5}$$

9.2.6 扩展不确定度

取包含因子 *k*=2，扩展不确定度为 *U*=*k*·*u_c*=1.0×10⁻⁴。

10 输入电阻

10.1 测量方法

采用示波器校准仪直接测量数字示波器的输入电阻。

10.2 测量模型

测量模型如式（10.1）所示。

$$\Delta R = R - R_0 \tag{10.1}$$

式中：

ΔR ——数字示波器的输入电阻误差，Ω；

R——数字示波器电阻标称值，Ω；

*R*₀——示波器校准仪测量的输入电阻值，Ω；

10.3 不确定度来源

- a) 测量重复性引入的不确定度*u*₁；
- b) 示波器校准仪电阻测量误差引入的不确定度*u*₂。

10.4 标准不确定度评定

a) 测量重复性引入的不确定度

按照 A 类方法评定测量重复性引入的不确定度。示波器校准仪测量数字示波器输入电阻 10 次，测量结果如表 10.1 所示。10 次测量的输入电阻平均值为 51.18Ω ，按照贝塞尔公式计算单次测量结果标准偏差 0.012Ω ，则测量重复性引入的不确定度为 $u_1=0.012\Omega$ 。

表 10.1 示波器校准仪测量数字示波器输入电阻数据

测量次数	1	2	3	4	5
测量值/ Ω	51.18	51.16	51.19	51.16	51.18
测量次数	6	7	8	9	10
测量值/ Ω	51.17	51.19	51.17	51.18	51.16

b) 示波器校准仪电阻测量误差引入的不确定度

根据示波器校准仪说明书， 50Ω 电阻测量最大允许误差为 $\pm 0.1\%$ ，测量 50Ω ，按照均匀分布取 $k=\sqrt{3}$ ，标准不确定度分量为 $u_2=0.05/\sqrt{3}=0.0289\Omega$ 。

11.5 合成标准不确定度

各标准不确定度分量汇总见表 10.2。

表 10.2 输入电阻测量的标准不确定度分量一览表

来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度		灵敏系数 c_i $i=1, 2$	标准不确定度 分量
				符号	数值		
测量重复性	A	--	--	u_1	0.012Ω	1	0.012Ω
示波器校准仪 阻抗测量误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	u_2	0.0289Ω	1	0.0289Ω

以上各标准不确定度分量不相关，则合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2}=0.031\Omega$$

10.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为 $U=k\cdot u_c=0.07\Omega$ 。

11 触发灵敏度

11.1 内触发灵敏度

11.1.1 测量方法

按校准规范中 7.13 校准方法连接仪器并实现校准测量，可知不确定度分量主要来源于示波器相关测量指标。

11.1.2 测量模型

示波器直接测量触发信号幅度，测量模型如式（11.1）所示。

$$T = T_m \tag{11.1}$$

式中：

T ——触发信号电平，V；

T_m ——触发信号测量电平，V；

11.1.3 不确定度来源

- a) 示波器测量幅度不准引入的不确定度 u_1 ；
- b) 示波器测量幅度重复性引入的不确定度 u_2 ；

11.1.4 标准不确定度评定

- a) 示波器测量电平误差引入的不确定度

以示波器垂直刻度设置为 100mV/div 为例，全量程为 800mV，直流偏置为 0mV，则全量程电平覆盖范围为-400mV~400mV。根据示波器指标手册可知，电平测量误差为 ±1%，按均匀分布取 $k=\sqrt{3}$ ，则示波器校准仪直流电平误差引入的不确定度 $u_1=0.577\%$ 。

- b) 示波器测量重复性引入不确定度

按 A 类方法评定测量重复性引入的不确定度。以示波器测量 100mV 量程触发电平为例，共测量 10 次，测量结果如表 1.1 所示。10 次测量的触发电平平均值为 97.42mV，按照贝塞尔公式计算单次测量结果标准偏差 0.90mV，则测量重复性引入的不确定度为 $u_2=0.9\%$ 。

表 11.1 示波器测量 100mV 档触发电平数据

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值(mV)	98.4	97.2	98.4	96.5	98.4	96.2	97.4	96.2	98.1	97.4

11.1.5 合成相对标准不确定度

各标准不确定度分量汇总见表 11.2。

表 11.2 直流电压测量的标准不确定度分量一览表

来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度	灵敏系数	标准不确定
----	------	----	-------	--------	------	-------

				符号	数值	c_i $i=1, 2$	定度分量
示波器测量电平误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	u_1	0.577%	1	0.58%
示波器测量重复性	A	——	——	u_2	0.9%	1	0.9%

以上各标准不确定度分量不相关，则合成相对标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{(c_1 u_1)^2 + (c_2 u_2)^2} = 1.1\%$$

11.1.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为 $U=k \cdot u_c=1.1\%$ 。

11.2 外触发灵敏度

11.2.1 测量方法

按校准规范中 7.13 校准方法连接仪器并实现校准测量，可知不确定度分量主要来源于示波器相关测量指标。

11.2.2 测量模型

示波器直接测量触发信号幅度，测量模型如式 (11.2) 所示。

$$T = T_m \quad (11.2)$$

式中：

T ——触发信号电平，V；

T_m ——触发信号测量电平，V；

11.2.3 不确定度来源

- 示波器测量幅度不准引入的不确定度 u_1 ；
- 示波器测量幅度重复性引入的不确定度 u_2 ；
- 功分器的端口不平衡度引入的不确定度 u_3 ；

11.2.4 标准不确定度评定

- 示波器测量电平误差引入的不确定度

以示波器垂直刻度设置为 100mV/div 为例，全量程为 800mV，直流偏置为 0mV，则全量程电平覆盖范围为 -400mV~400mV。根据示波器指标手册可知，电平测量误差为 $\pm 1\%$ ，按均匀分布取 $k=\sqrt{3}$ ，则示波器校准仪直流电平误差引入的不确定度 $u_1=0.577\%$ 。

- 示波器测量重复性引入不确定度

按 A 类方法评定测量重复性引入的不确定度。以示波器测量 100mV 量程触发电平为例，共测量 10 次，测量结果如表 11.3 所示。10 次测量的触发电平平均值为 98.79mV，按照贝塞尔公式计算单次测量结果标准偏差 0.57mV，则测量重复性引入的不确定度为 $u_2=0.6\%$ 。

- 功分器不平衡度引入的不确定度

根据功分器指标手册可知，在 80GHz 时其端口功率不平衡度为±0.2dB，按均匀分布取 $k=\sqrt{3}$ ，则示波器校准仪直流电平误差引入的不确定度 $u_1=0.115\text{dB}=2.7\%$ 。

表 11.3 示波器测量 100mV 档触发电平数据

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值(mV)	99.5	98.7	99.2	97.9	99.3	98.6	98.4	98.1	99.5	98.7

11.2.5 合成相对标准不确定度

各标准不确定度分量汇总见表 11.4。

表 11.4 直流电压测量的标准不确定度分量一览表

来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度		灵敏系数 c_i $i=1, 2$	标准不确定度分量
				符号	数值		
示波器测量电平误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	u_1	0.577%	1	0.58%
示波器测量重复性	A	——	——	u_2	0.9%	1	0.9%
功分器端口不平衡	B	均匀	$\sqrt{3}$	u_3	2.7%	1	2.7%

以上各标准不确定度分量不相关，则合成相对标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{(c_1u_1)^2 + (c_2u_2)^2 + (c_3u_3)^2} = 2.9\%$$

11.2.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为 $U=k\cdot u_c=2.9\%$ 。

12 回波损耗

12.1 测量方法

采用网络分析仪直接测量示波器的回波损耗。

12.2 测量模型

测量模型如式（12.1）所示。

$$L = L_1 \tag{12.1}$$

式中：

L ——示波器的回波损耗测量值，dB；

L_1 ——网络分析仪测量示波器端口回波损耗的显示值，dB；

12.3 不确定度来源

- a) 网络分析仪回波损耗测量误差引入的不确定度 u_1 ；
- b) 网络分析仪测量重复性引入的不确定度 u_2 ；
- c) 网络分析仪回波损耗测量分辨力引入的不确定度 u_3 。

12.4 标准不确定度评定

- a) 网络分析仪回波损耗测量误差引入的不确定度 u_1

根据网络分析仪 N5290A 说明书，网络分析仪测量回波损耗的最大允许误差为±0.2dB，按照均匀分布取 $k=\sqrt{3}$ ，标准不确定度分量为 $u_2=0.2/\sqrt{3}=0.1154$ dB。

- b) 测量重复性引入的不确定度

按照 A 类方法评定测量重复性引入的不确定度。用网络分析仪测量万里眼 80GHz 示波器在 100mV/div 挡位的回波损耗，测量结果如表 12.1 所示。10 次测量的回波损耗平均值为 17.497dB，按照贝塞尔公式计算单次测量结果标准偏差 0.047dB，则测量重复性引入的不确定度为 $u_1=0.05$ dB。

表 12.1 网络分析仪测量示波器回波损耗数据

测量次数	1	2	3	4	5
测量值/dB	17.52	17.48	-17.43	17.56	17.55
测量次数	6	7	8	9	10
测量值/ dB	17.43	17.51	17.46	17.49	17.54

- c) 网络分析仪回波损耗测量分辨力引入的不确定度

网络分析仪测量示波器端口回波损耗时测量分辨力为 0.001dB，按照均匀分布取 $k=\sqrt{3}$ ，标准不确定度分量为 $u_2=0.001/2\sqrt{3}=0.0003$ dB。

12.5 合成标准不确定度

各标准不确定度分量汇总见表 12.2。

表 12.2 输入电阻测量的标准不确定度分量一览表

来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度		灵敏系数 c_i $i=1, 2$	标准不确定度 分量
				符号	数值		

网络分析仪回波损耗测量误差	B	均匀	$\sqrt{3}$	u_1	0.12dB	1	0.12dB
测量重复性	A	--	--	u_2	0.05dB	1	0.05dB
测量分辨力	B	均匀	$\sqrt{3}$	u_3	0.0003dB	1	0.0003dB

以上各标准不确定度分量不相关，则合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2}=0.3\text{dB}$$

12.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为 $U=k\cdot u_c=0.6\text{dB}$ 。
