

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 2078—2023

实时频谱分析仪校准规范

Calibration Specification for Real-time Spectrum Analyzers



2023-10-12 发布

2024-04-12 实施

国家市场监督管理总局 发布

实时频谱分析仪校准规范

Calibration Specification for
Real-time Spectrum Analyzers

JJF 2078—2023

归口单位：全国无线电计量技术委员会

主要起草单位：中国计量科学研究院

上海市计量测试技术研究院

中国工程物理研究院计量测试中心

参加起草单位：上海芯问科技有限公司

本规范主要起草人：

何 昭（中国计量科学研究院）

詹志强（上海市计量测试技术研究院）

王建忠（中国工程物理研究院计量测试中心）

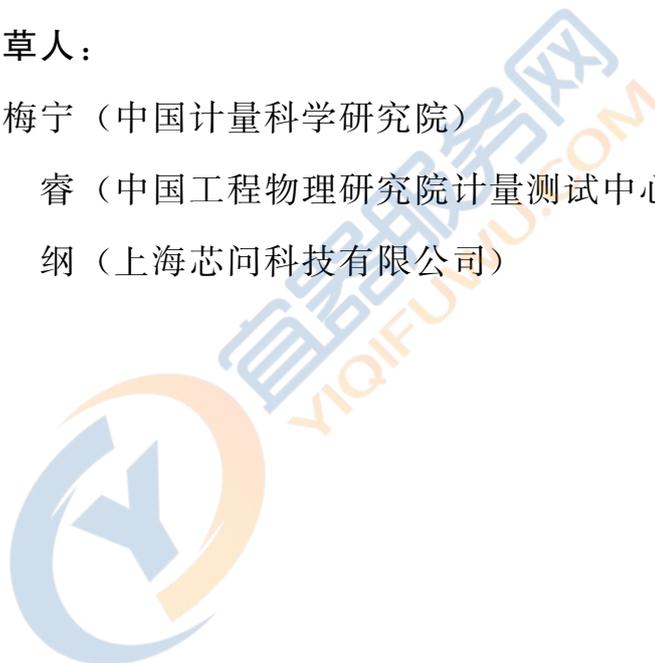
魏 竹（中国工程物理研究院计量测试中心）

参加起草人：

聂梅宁（中国计量科学研究院）

张 睿（中国工程物理研究院计量测试中心）

陈 纲（上海芯问科技有限公司）



目 录

引言	(II)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 术语	(1)
4 概述	(2)
5 计量特性	(2)
5.1 最大实时分析带宽	(2)
5.2 实时分析带宽	(2)
5.3 全捕获最小脉宽时的全幅度准确度	(2)
5.4 不同信号模板比全捕获最小脉宽时的幅度比	(2)
5.5 频率模板触发电平	(2)
5.6 无杂散动态范围	(2)
5.7 带内频率响应	(2)
5.8 参考频率	(2)
5.9 频率响应	(3)
6 校准条件	(3)
6.1 环境条件	(3)
6.2 测量标准	(3)
7 校准项目和校准方法	(4)
7.1 外观及工作正常性检查	(4)
7.2 最大实时分析带宽	(4)
7.3 实时分析带宽	(5)
7.4 全捕获最小脉宽时的幅度比	(5)
7.5 不同信号模板比全捕获最小脉宽时的幅度比	(7)
7.6 频率模板触发电平	(7)
7.7 无杂散动态范围	(9)
7.8 带内频率响应	(9)
7.9 参考频率准确度	(10)
7.10 频率响应	(11)
8 校准结果的表达	(11)
9 复校时间间隔	(12)
附录 A 原始记录内页格式	(13)
附录 B 校准证书内页格式	(16)
附录 C 主要项目校准不确定度评定示例	(19)

引 言

JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》和 JJF 1059.1—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。

本规范为首次发布。



实时频谱分析仪校准规范

1 范围

本规范适用于频率范围为 3 Hz~50 GHz 实时频谱分析仪和频谱分析仪中实时频谱分析模块的校准，其他频率范围的实时频谱分析仪和实时频谱分析模块的校准可参照执行。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

JJF 1396 频谱分析仪校准规范

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（包括所有的修改单）适用于本规范。

3 术语

3.1 全捕获最小脉宽 min time of full intercept; MTFI

实时频谱分析仪 100% 捕获的最窄脉冲持续时间。

3.2 全捕获幅度比 amplitude ratio of full intercept; ARFI

100% 幅度准确度

当输入信号的脉宽从宽至窄时，信号幅度与连续波状态下的幅度之差。

3.3 无杂散动态范围 spurious free dynamic range; SFDR

ADC（模数转换器）载波频率（最大信号成分）的均方根幅度与实时分析带宽内的最大噪声成分的均方根值之比，通常以 dBc（相对于载波频率幅度）或 dBFS（相对于 ADC 的满量程范围）表示。

3.4 瀑布图 spectrogram

时频图

频谱图

实时频谱分析仪的一种显示方式，其中频率用 x 轴表示，时间用 y 轴表示，功率用颜色表示。

3.5 实时分析带宽 real-time analyzing wideband; RAW

与实时频谱分析仪的数字转换器和中频带宽相对应的，可以进行实时无缝捕获的频率跨度。

注：实时频谱分析仪的实时分析带宽与扫频式频谱分析仪的扫频宽度类似。

3.6 频率模板触发 frequency mask trigger; FMT

在实时频谱分析仪频域，一种以预设的频率—幅度门限为触发条件的触发方式。

3.7 带内频率响应 frequency response during span; FRS

最大实时分析带宽内的幅频特性。

4 概述

实时频谱分析仪（以下简称实时频谱仪）主要用于捕获和分析瞬态及动态信号。实时频谱仪主要由本振、混频、滤波、采样、数据处理、显示等部分组成，典型的实时频谱仪结构如图 1 所示。其将微波信号下变频到中频，然后 ADC 数字化宽带中频信号，下变频、滤波和检测均以数字方式进行，时域、频域转换使用 FFT（快速傅里叶变换）算法完成。

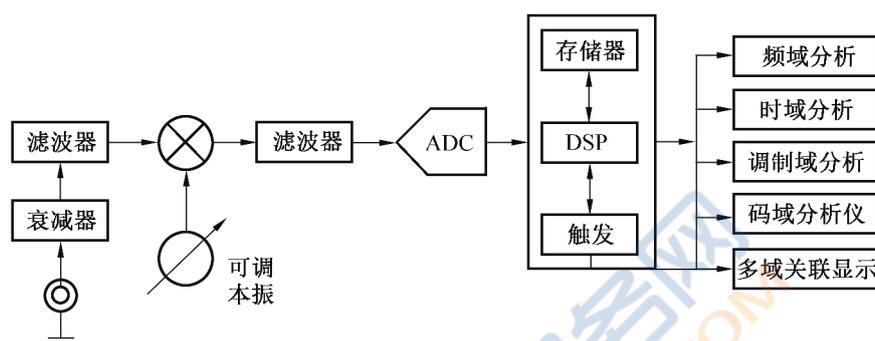


图 1 典型的实时频谱仪结构

5 计量特性

5.1 最大实时分析带宽

最大实时分析带宽：512 MHz。

5.2 实时分析带宽

实时分析带宽范围：10 Hz~512 MHz；

最大允许误差： $\pm 0.3\%$ 。

5.3 全捕获最小脉宽时的全幅度准确度

最小脉宽：1.8 μs ；

幅度比最大允许误差： ± 1.0 dB。

5.4 不同信号模板比全捕获最小脉宽时的幅度比

最小脉宽：7 ns（信号模板比：0 dB~60 dB）；

幅度比最大允许误差： ± 1.0 dB。

5.5 频率模板触发电平

电平范围：0 dBm~-50 dBm，最大允许误差： $\pm (1.0 \text{ dB} + \text{频率响应})$ ；

电平范围：-50 dBm~-60 dBm，最大允许误差： $\pm (2.5 \text{ dB} + \text{频率响应})$ 。

5.6 无杂散动态范围

无杂散动态范围： ≥ -80 dBc。

5.7 带内频率响应

频率响应最大允许误差： ± 0.3 dB。

5.8 参考频率

频率标称值：10 MHz；

频率准确度： 1×10^{-9} 。

5.9 频率响应

频率范围：3 Hz~50 GHz；

频率响应最大允许误差： $\pm (0.2 \sim 3)$ dB。

注：以上技术指标不作为合格性判据，仅提供参考，校准时应以被校实时频谱仪技术说明书中所列技术参数要求为准。

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 环境温度： (23 ± 5) °C。

6.1.2 相对湿度： $\leq 80\%$ 。

6.1.3 电源电压及频率： (220 ± 11) V， (50 ± 1) Hz。

6.1.4 其他：周围无影响校准工作正常进行的电磁干扰及机械振动。

6.2 测量标准

6.2.1 信号发生器

频率范围及频率准确度：250 kHz~2 GHz， 1×10^{-7} ；

最小脉冲调制宽度：7 ns；

相位噪声： < -110 dBc/Hz（偏离载频 1 MHz）。

6.2.2 信号发生器

频率范围及频率准确度：250 kHz~50 GHz， 1×10^{-7} ；

输出电平范围：250 kHz~3.2 GHz， -20 dBm~13 dBm，

3.2 GHz~40 GHz， -20 dBm~9 dBm，

40 GHz~50 GHz， -20 dBm~5 dBm；

谐波失真：载频 < 2 GHz， < -30 dBc；载频 ≥ 2 GHz， < -50 dBc；

相位噪声： < -113 dBc/Hz（偏离载频 1 kHz）；

< -126 dBc/Hz（偏离载频 10 kHz）。

6.2.3 函数发生器

频率范围及频率准确度：3 Hz~250 kHz， 1×10^{-7} ；

输出电平范围： -20 dBm~13 dBm。

6.2.4 峰值功率计

频率范围：50 MHz~2 GHz；

峰值功率测量范围： -20 dBm~10 dBm；

峰值功率测量最大允许误差： ± 0.3 dB。

6.2.5 功率计

频率范围：3 Hz~50 GHz；

功率测量范围： -30 dBm~10 dBm；

功率测量最大允许误差： $\pm (0.1 \sim 1.0)$ dB。

6.2.6 标准可变衰减器

频率范围：10 kHz~2 GHz；
 衰减范围：0 dB~70 dB，步进 1 dB；
 衰减最大允许误差：±0.06 dB/10 dB。

6.2.7 频率计

频率测量范围：10 Hz~100 MHz；
 频率测量准确度：优于 1×10^{-10} ；
 分辨力：0.1 Hz。

6.2.8 数字示波器

实时带宽： ≥ 2 GHz；
 存储深度： $\geq 10^7$ ；
 内部时基准确度： 1×10^{-6} 。

6.2.9 功分器

频率范围：3 Hz~50 GHz；
 对称性最大允许误差：±0.25 dB。

7 校准项目和校准方法

校准项目见表 1。

表 1 校准项目表

序号	校准项目名称
1	最大实时分析带宽
2	实时分析带宽
3	全捕获最小脉宽时的幅度比
4	不同信号模板比全捕获最小脉宽时的幅度比
5	频率模板触发电平
6	无杂散动态范围
7	带内频率响应
8	参考频率
9	频率响应

7.1 外观及工作正常性检查

7.1.1 被校实时频谱仪应带有必要的附件。

7.1.2 被校实时频谱仪各按键、开关、旋钮等应调节正常，不应有影响电气性能的机械损伤。

7.1.3 被校实时频谱仪通电后应能正常工作、显示清晰。

7.1.4 校准所用标准器和被校实时频谱仪应按照技术说明书要求完成预热，被校实时频谱仪应按照技术说明书要求完成全自校准。

7.2 最大实时分析带宽

7.2.1 校准连接框图如图 2 所示。

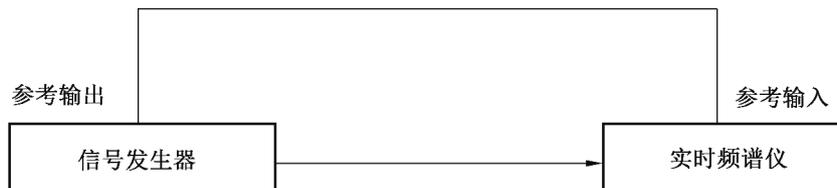


图 2 实时分析带宽的校准连接框图

7.2.2 设置实时频谱仪中心频率为 1 GHz，参考电平为 0 dBm，实时分析带宽为最大值，RBW（分辨力带宽）为最大值，选择显示方式为瀑布图（或其他实时频谱分析模式），触发方式为自由触发。

7.2.3 设置信号发生器为脉冲调制状态，载波频率为 1 GHz，输出功率为 -10 dBm，脉冲周期为 30 ms，脉宽为全捕获最小脉宽标称值的 10 倍，打开射频输出。

注：ALC 设定以能否输出稳定的脉冲调制信号为原则。

7.2.4 设置信号发生器输出频率为 $1\text{ GHz} \pm (\text{span} \times 0.8) / 2$ ，分别读取两次信号输出时实时频谱仪的载波信号频率读数，记为 f_1 和 f_2 ，按式 (1) 计算最大实时分析带宽，记录于表 A.1 中。

$$\text{RAW}_{\max} = 1.25 \times (f_1 - f_2) \quad (1)$$

式中：

RAW_{\max} ——最大实时分析带宽，MHz；

f_1 ——信号发生器频率为 $1\text{ GHz} + \text{span}/2$ 时，实时频谱仪频率示值，MHz；

f_2 ——信号发生器频率为 $1\text{ GHz} - \text{span}/2$ 时，搜索频谱仪频率示值，MHz。

7.3 实时分析带宽

7.3.1 仪器连接如图 2 所示。

7.3.2 设置实时频谱仪扫频宽度为标称值，中心频率为 1 GHz，参考电平为 0 dBm，RBW、视频带宽、扫描时间自动。

7.3.3 设置信号发生器为脉冲调制状态，载波频率为 1 GHz，输出功率为 -10 dBm，脉冲周期为 30 ms，脉宽为全捕获最小脉宽标称值的 10 倍，打开射频输出。

7.3.4 设置信号发生器输出频率为 $1\text{ GHz} \pm (\text{span} \times 0.8) / 2$ ，依次打开实时频谱仪峰值标记和增量标记，执行峰值搜索，读取频率差 S_0 ，并记录于表 A.2 中。实时分析带宽实际值可由式 (2) 计算得到，将其记录于表 A.2 中。

$$S = 1.25 \times S_0 \quad (2)$$

式中：

S ——被校实时频谱仪实时分析带宽实测值，MHz；

S_0 ——实时频谱仪两次频率测量之差，MHz。

7.3.5 按照表 A.2 设置成其他实时分析带宽，重复操作步骤 7.3.2~7.3.4。

7.4 全捕获最小脉宽时的幅度比

7.4.1 光标实时读取法

7.4.1.1 连接如图 3 所示。

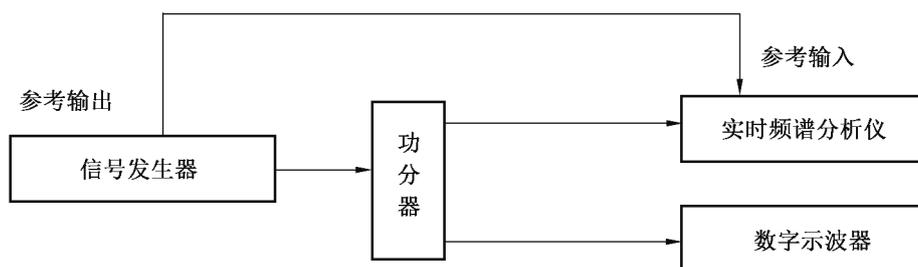


图3 全捕获最小脉宽时的幅度比较校准连接框图

7.4.1.2 实时频谱仪设置为实时频谱分析模式并复位，中心频率为 1 GHz，实时分析带宽为最大值，参考电平为 0 dBm；根据技术说明书要求选择滤波器类型（如 Blackman-Harris），RBW 选择最大值。

7.4.1.3 设置信号发生器为连续波状态，载波频率为 1 GHz，输出功率为 -4 dBm，打开射频输出。

7.4.1.4 实时频谱仪测量菜单中选择频谱测量，先后按峰值搜索键、光标键和 delta 键，此时实时频谱仪的 ΔMkr1 显示为 0 Hz、0.00 dB。

7.4.1.5 设置信号发生器为脉冲调制状态，脉冲周期为 30 ms，脉冲调制开，调节信号发生器输出信号的脉宽，使数字示波器脉宽读数为全捕获最小脉宽。

7.4.1.6 调整实时频谱仪的扫描时间，使波形稳定显示，按峰值搜索键，读取频谱仪的幅度差值，记录于表 A.3 中。

7.4.1.7 按照技术说明书的要求，选择其他滤波器类型，重复步骤 7.4.1.3~7.4.1.6。

7.4.2 非光标实时读取法

7.4.2.1 仪器连接如图 3 所示。

7.4.2.2 实时频谱仪设置为实时频谱分析模式并复位，中心频率为 1 GHz，实时分析带宽为最大值，参考电平为 0 dBm；根据技术说明书要求选择滤波器类型（如 Blackman-Harris），RBW 选择最大值。

7.4.2.3 设置信号发生器为连续波输出，载波频率为 1 GHz，输出功率为 -4 dBm，打开射频输出。

7.4.2.4 实时频谱仪选择显示方式为瀑布图（或其他实时频谱分析模式），按峰值搜索键，读取此时实时频谱仪上的峰值功率示值 P_1 ，记录于表 A.3 中。

7.4.2.5 设置信号发生器为脉冲调制状态，脉冲周期为 30 ms，脉冲调制开，调节信号发生器输出信号的脉宽，使数字示波器脉宽读数为全捕获最小脉宽。

7.4.2.6 用峰值功率计替换数字示波器。实时频谱仪启动运行键，一段时间后，按停止键；在瀑布图中按光标键，将光标移动到帧像周期（frame time）处激活，此时频域图上会有明显的信号频谱图出现，前后移动光标，直到找到频谱图的峰值功率最大处，即该帧的中心位置，利用峰值搜索得到该帧的功率示值 P_2 ，记录于表 A.3 中。

7.4.2.7 按式 (3) 计算全捕获最小脉宽时的幅度比，并记录于表 A.3 中。

$$P_r = P_2 - P_1 \quad (3)$$

式中：

P_r ——全捕获最小脉宽时的幅度比，dB；

P_2 ——脉冲调制模式下实时频谱仪的幅度示值，dBm；

P_1 ——连续波模式下实时频谱仪的幅度示值，dBm。

7.4.2.8 按照技术说明书的要求，在不同的 RBW 值和滤波器类型下重复步骤 7.4.2.3～7.4.2.7。

7.5 不同信号模板比全捕获最小脉宽时的幅度比

7.5.1 光标实时读取法

7.5.1.1 仪器连接如图 3 所示。

7.5.1.2 设置实时频谱仪为实时频谱分析模式并复位，中心频率为 1 GHz，实时分析带宽为最大值，参考电平为 0 dBm。

7.5.1.3 设置信号发生器为脉冲调制状态，载波频率为 1 GHz，输出功率为 -10 dBm，脉冲周期为 30 ms，脉宽为全捕获最小脉宽标称值的 10 倍，打开射频输出。

7.5.1.4 根据技术说明书要求选择实时频谱仪滤波器类型（如矩形），RBW 选择最小值，调整频谱仪的扫描时间，使波形稳定显示。

7.5.1.5 实时频谱仪测量菜单中选择频谱测量，先后按峰值搜索键、光标键和 delta 键，此时实时频谱仪的 ΔMkr1 显示为 0 Hz、0.00 dB。

7.5.1.6 根据技术说明书的要求，设置信号发生器所需的信号脉宽，读取实时频谱仪测量得到的幅度差值。记录于表 A.4 中。

7.5.2 非光标实时读取法

7.5.2.1 仪器连接如图 3 所示。

7.5.2.2 重复步骤 7.5.1.2～7.5.1.4。

7.5.2.3 实时频谱仪测量菜单中选择频谱测量，按峰值搜索键读取幅度值 P_3 ，并记录于表 A.4 中。

7.5.2.4 根据技术说明书的要求，设置信号发生器所需的信号脉宽，读取此时频谱仪的幅度值 P_4 ，并记录于表 A.4 中。

7.5.2.5 按公式（4）计算幅度下降值，并记录于表 A.4 中。

$$P_L = P_4 - P_3 \quad (4)$$

式中：

P_L ——不同信号模板比时全捕获最小脉宽时的幅度比，dB；

P_4 ——不同调制脉宽下实时频谱仪的幅度示值，dBm；

P_3 ——10 倍全捕获最小脉宽标称值时实时频谱仪的幅度示值，dBm。

7.6 频率模板触发电平

7.6.1 校准连接如图 4 所示。

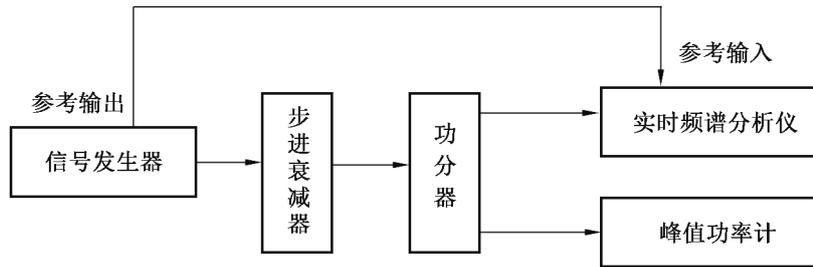


图4 频率模板触发电平校准连接框图

7.6.2 实时频谱仪设置为瀑布图（或其他实时频谱分析模式）并复位，中心频率为1 GHz，实时分析带宽为最大值，参考电平为0 dBm；根据技术说明书的要求选择能实现最小信号脉宽测量的RBW。编辑实时频谱仪频率触发模板FMT，编辑参数如表2所示，频率触发模板示意图如图5所示。

表2 FMT 触发模板

位置/MHz	功率标称值/dBm
-10.000	-20
10.000	-20

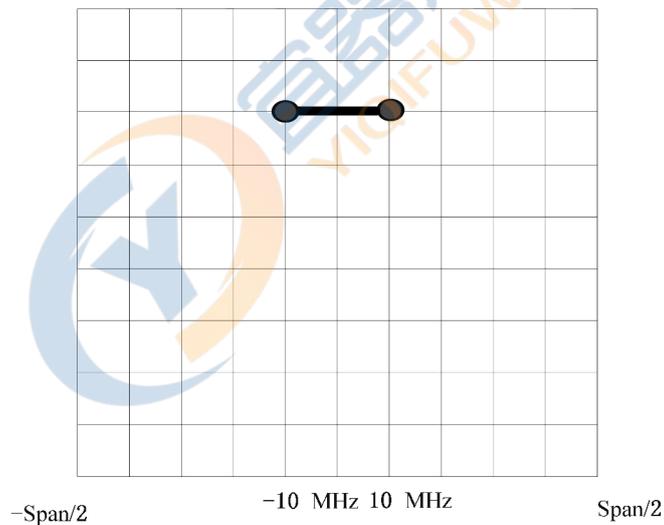


图5 频率触发模板示意图

7.6.3 设置信号发生器为脉冲调制状态，载波频率为1 GHz，输出功率为-10 dBm，脉冲周期为30 ms，脉宽为全捕获最小脉宽标称值的10倍，打开射频输出。

7.6.4 设置实时频谱仪的触发方式为模板内触发，步进衰减器置0 dB，调整信号发生器输出功率，使峰值功率计的峰值功率示值为-10 dBm。

注：

- 1 不同仪器模板内触发命令不同，如 inside Trigger、Trigger condition Entering 等。
- 2 选择 inside 标准就是信号幅度在其上面的模板之内就可以触发，大于-20 dBm 就可以触发，包括-10 dBm。
- 3 编辑频率触发模板时，对于无法删除起始频率点和终止频率点的实时频谱仪，此时将起始频率点和终止频率点的电平设置成与±10 MHz 处电平值一致。

7.6.5 按照 1 dB 步进增加步进衰减器衰减量，当出现信号跳动或者信号消失等不能可靠触发时，步进衰减器回调 1 dB，使用信号发生器进行微调，按照 0.1 dB 的步进减小输出信号功率，至不能可靠触发，读取此时衰减器的衰减量 A_1 和信号发生器的功率调整量 L_1 ，记录于表 A.5 中，按式 (5) 计算触发电平实测值。

$$L_m = -10 \text{ dBm} - A_1 - L_1 \quad (5)$$

式中：

L_m ——触发电平实测值，dBm；

A_1 ——衰减器衰减量，dB；

L_1 ——信号发生器的功率调整量，dB。

7.6.6 根据表 A.5 中的其他功率标称值，改变实时频谱仪中的 FMT 触发模板，选择合适的步进衰减器 10 dB 步进挡。

7.6.7 重复步骤 7.6.5，完成校准。

7.7 无杂散动态范围

7.7.1 光标实时读取法

7.7.1.1 仪器连接如图 2 所示。实时频谱仪设置为实时频谱分析模式并复位，中心频率为 1 GHz，实时分析带宽为最大值，参考电平为 0 dBm，根据技术说明书要求选择滤波器类型（如 Blackman-Harris），RBW 选择最大值。

7.7.1.2 设置信号发生器为连续波状态，载波频率为 1 GHz，输出电平为 -4 dBm，打开射频输出。

7.7.1.3 实时频谱仪选择轨迹平均功能或检波器选择平均方式。

7.7.1.4 对于具有实时光标功能的频谱仪，先后按峰值搜索键、光标键和 delta 键，移动 delta 键到实时分析带宽内的最大杂散信号处，读取此时 delta 值，并记录于表 A.6 中。

7.7.2 非光标实时读取法

7.7.2.1 仪器连接如图 2 所示。

7.7.2.2 重复步骤 7.7.1.2~7.7.1.4。

7.7.2.3 实时频谱仪启动运行键，一段时间后，按停止键；在瀑布图中按光标键，将光标移动到帧像周期（frame time）处激活，此时频域图上会有明显的信号频谱图出现，前后移动光标，直至找到频谱图的峰值功率最大处，即该帧的中心位置，利用峰值搜索得到该帧的功率示值 P_5 ，并记录于表 A.6 中。

7.7.2.4 移动光标到实时分析带宽内的最大杂散信号处，读取此时实时频谱仪的功率示值 P_6 ，并记录于表 A.6 中；按式 (6) 计算实时频谱仪无杂散动态范围，并记录于表 A.6 中。

$$\text{SFDR} = P_6 - P_5 \quad (6)$$

式中：

SFDR——实时频谱仪无杂散动态范围，dBc；

P_6 ——实时分析带宽内的最大杂散信号处的幅度示值，dBm；

P_5 ——载波信号幅度示值，dBm。

7.8 带内频率响应

7.8.1 仪器连接如图 6 所示。

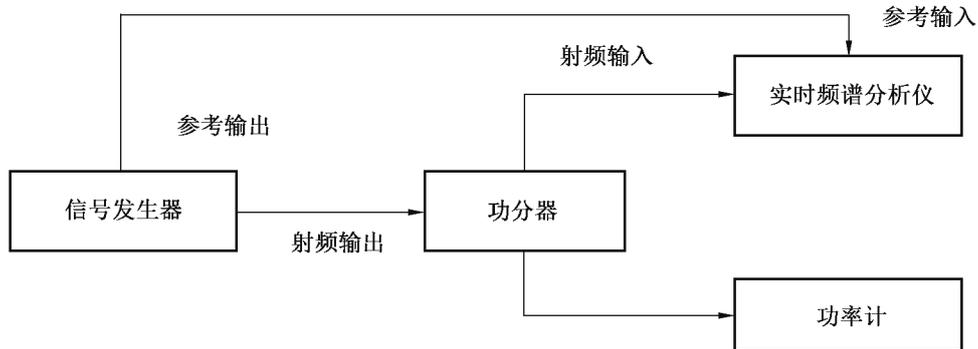


图 6 带内频率响应校准连接框图

7.8.2 实时频谱仪设置为实时频谱分析模式并复位，中心频率为 1 GHz，实时分析带宽为最大值，参考电平为 -9 dBm，垂直显示刻度 1 dB/div，根据技术说明书要求选择滤波器类型（如 Blackman-Harris），RBW 选择最大值，其余自动。

7.8.3 设置信号发生器为连续波状态，载波频率为 1 GHz，输出功率为 -4 dBm，打开射频输出。

7.8.4 记录此时功率计示值并作为参考，实时频谱仪按峰值搜索键，读取此时实时频谱仪上的功率示值 P_{ref} ，并记录于表 A.7 中。

7.8.5 根据表 A.7 改变信号发生器频率，调节信号发生器功率使功率计示值保持不变，读取此时实时频谱仪的功率示值 P_m ，并记录于表 A.7 中。

7.8.6 按式 (7) 计算带内频率响应。

$$\Delta_m = P_m - P_{\text{ref}} \quad (7)$$

式中：

Δ_m ——实时频谱仪带内频率响应，dB；

P_m ——实时分析带宽内某频率处，实时频谱仪的功率示值，dBm；

P_{ref} ——参考频率处，实时频谱仪的功率示值，dBm。

7.9 参考频率准确度

7.9.1 仪器连接如图 7 所示。



图 7 参考频率准确度校准连接图

7.9.2 频率计设置成最高分辨力或者是闸门时间设置成 10 s。

7.9.3 读取此时频率计示值 f_0 ，并记录于表 A.8 中。

7.9.4 按公式 (8) 计算参考频率准确度，并记录于表 A.8 中。

$$y = \frac{|f_m - f_0|}{f_0} \quad (8)$$

式中：

y ——实时频谱仪参考频率准确度；

f_m ——实时频谱仪参考频率标称值，MHz；

f_0 ——频率计示值，MHz。

7.10 频率响应

7.10.1 仪器连接如图 6 所示。

7.10.2 选择实时频谱仪校准信号频率为参考频率点，置实时频谱仪中心频率为其校准信号频率 f_0 ，并记录于表 A.9 中；置实时分析带宽为最大值，参考电平为 -9 dBm，垂直显示刻度 1 dB/div，根据技术说明书要求选择滤波器类型（如 Blackman-Harris），RBW 选择 1 kHz，其余自动。

7.10.3 设置信号发生器为连续波状态，载波频率为实时频谱仪校准信号频率，输出功率为 -4 dBm，微调信号发生器输出功率，使实时频谱仪上峰值标记读数为 -10 dBm，将其记录于表 A.9 中，作为实时频谱仪参考功率。

7.10.4 读取此时功率计示值 L_{PMR} ，并记录于表 A.9 中。

7.10.5 按表 A.9 设置信号发生器载波频率和实时频谱仪的中心频率，读取实时频谱仪上峰值标记读数 L_{SA} ，并记录于表 A.9，记录功率计读数于表 A.9 的 L_{PM} 表格中。

7.10.6 按式 (9) 计算各个频率点的输入频率响应 FR 。并记录于附录 A 表 A.9 中。

$$FR = (L_{SA} - L_{PM}) - (-10 \text{ dBm} - L_{PMR}) \quad (9)$$

式中：

FR ——实时频谱仪频率响应，dB；

L_{SA} ——校准频率处，实时频谱仪的功率示值，dBm；

L_{PM} ——校准频率处，功率计的功率示值，dBm；

L_{PMR} ——参考频率处，功率计的功率示值，dBm。

8 校准结果的表达

实时频谱仪校准后，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或应用有关时，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 2 年。



附录 A

原始记录内页格式

被校实时频谱仪外观检查

正常 不正常

被校实时频谱仪工作正常性检查

正常 不正常

表 A.1 最大实时分析带宽

标称值 MHz	f_1 MHz	f_2 MHz	实测值 RAW_{max} MHz	不确定度 ($k=2$) MHz

表 A.2 实时分析带宽

标称值 MHz	频率差 S_0 MHz	实测值 S MHz	不确定度 ($k=2$) %

表 A.3 全捕获最小脉宽时的幅度比

RBW 值: _____

RBW 滤波器: _____

脉宽 μs	P_1 dBm	P_2 dBm	P_r dB	不确定度 ($k=2$) dB

表 A.4 不同信号模板比时全捕获最小脉宽时的幅度比

RBW 值: _____

RBW 滤波器: _____

脉宽 μs	P_3 dBm	P_4 dBm	P_L dB	不确定度 ($k=2$) dB

表 A.5 频率模板触发电平

触发方式：进入触发

标称值 dBm	A_1 dBm	L_1 dBm	实测值 L_m dBm	不确定度 ($k=2$) dB
-20				
-30				
-40				
...				

表 A.6 无杂散动态范围

载波频率 GHz	P_5 dBm	P_6 dBm	SFDR dBc	DANL dBc	不确定度 ($k=2$) dB

表 A.7 带内频率响应

偏移载波频率	P_{ref} dBm	P_m dBm	Δ_m dB	不确定度 ($k=2$) dB
0 MHz	REF	REF	---	---
-1 MHz				
-2 MHz				
-5 MHz				
-10 MHz				
...				
1 MHz				
2 MHz				
5 MHz				
10 MHz				
...				

表 A.8 参考频率准确度

参考频率 MHz	f_m MHz	f_0 MHz	参考频率准确度 y %	不确定度 ($k=2$)
10				

表 A.9 频率响应

频率 GHz	L_{SA} dBm	L_{PM} dBm	L_{PMR} dBm	FR dB	不确定度 ($k=2$) dB
f_0	-10	----		REF	----
0.1			----		
0.5			----		
1			----		
5			----		
10			----		
...			----		



附录 B

校准证书内页格式

表 B.1 最大实时分析带宽

标称值 MHz	实测值 RAW_{max} MHz	不确定度 ($k=2$) MHz

表 B.2 实时分析带宽

标称值 MHz	实测值 S MHz	不确定度 ($k=2$) %

表 B.3 全捕获最小脉宽时的幅度比

RBW 值: _____

RBW 滤波器: _____

脉宽 μs	P_r dB	不确定度 ($k=2$) dB

表 B.4 不同信号模板比时全捕获最小脉宽时的幅度比

RBW 值: _____

RBW 滤波器: _____

脉宽 μs	P_L dB	不确定度 ($k=2$) dB

表 B.5 频率模板触发电平

触发方式：进入触发

标称值 dBm	A_1 dBm	L_1 dBm	实测值 L_m dBm	不确定度 ($k=2$) dB
-20				
-30				
-40				
...				

表 B.6 无杂散动态范围

载波频率 GHz	DANL dBc	不确定度 ($k=2$) dB

表 B.7 带内频率响应

偏移载波频率	Δ_m dB	不确定度 ($k=2$) dB
0	---	---
-1 MHz		
-2 MHz		
-5 MHz		
-10 MHz		
...		
1 MHz		
2 MHz		
5 MHz		
10 MHz		
...		

表 B.8 参考频率准确度

参考频率 MHz	参考频率准确度 y	不确定度 ($k=2$)
10		

表 B.9 频率响应

频率 GHz	FR dB	不确定度 ($k=2$) dB
f_0	REF	——
0.1		
0.5		
1		
5		
10		
...		



附录 C

主要项目校准不确定度评定示例

C.1 实时分析带宽

C.1.1 测量模型

实时频谱仪的实时分析带宽是使用信号发生器直接测量。

实时分析带宽实际值由下式计算得到：

$$S = 1.25 \times S_0$$

式中：

S ——被校实时频谱仪实时分析带宽实测值，MHz；

S_0 ——实时频谱仪两次频率测量之差，MHz。

C.1.2 不确定度来源

a) 信号发生器频率准确度引入的不确定度 u_1 ；

b) 实时频谱仪分辨力引入的不确定度 u_2 ；

c) 测量重复性引入的不确定度 u_3 。

经分析，上述各不确定度分量之间彼此不相关，对各分量求偏导，得到的灵敏系数 c 为：

$$c_1 = c_2 = c_3 = 1.25$$

C.1.3 标准不确定度评定

1) 信号发生器频率准确度引入的不确定度 u_1

依据信号发生器技术说明书，其频率准确度为 3.45×10^{-8} ，设测量值落在该区间内的概率分布服从均匀分布， $k = \sqrt{3}$ 。信号发生器为两次输出 $1 \text{ GHz} \pm \text{span}/2$ 信号，因此由信号发生器频率不准引入的不确定度 u_1 为：

$$u_1 = \sqrt{2} \times 3.45 \times 10^{-8} \times 10^9 / \sqrt{3} = 28.2 \text{ Hz}$$

2) 实时频谱仪分辨力引入的标准不确定度 u_2

实时分析带宽为 50 MHz 时，实时频谱仪分辨力为 0.01 MHz， $a_2 = \pm 5 \text{ kHz}$ ，设测量值落在该区间内的概率分布为均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，由于实时频谱仪进行了两次测量，因此由实时频谱仪分辨力引入的标准不确定度分量 u_2 为：

$$u_2 = \sqrt{2} \times 5 \text{ kHz} / \sqrt{3} = 4.08 \text{ kHz}$$

3) 测量重复性引入的不确定度 u_3

实时频谱仪实时分析带宽为 50 MHz 时，信号发生器输出频率差为 40 MHz 的信号，短时间内对实时频谱仪频率差进行 10 次测量，测量结果见表 C.1。

表 C.1 实时分析带宽测量重复性

测量列	测量值 MHz
1	40.00
2	40.00
3	40.00
4	40.00
5	40.00
6	40.00
7	40.00
8	40.00
9	40.00
10	40.00

则单次测量结果的实验标准差：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0.0 \text{ Hz}$$

即 $u_3 = 0.0 \text{ Hz}$ 。

C.1.4 合成标准不确定度

1) 不确定度分量汇总

不确定度分量汇总见表 C.2。

表 C.2 测量不确定度分量汇总表

序号	不确定度分量							
	不确定度来源	分量	评定方法	分布	包含因子	标准不确定度	c_i	输出量标准不确定度分量
1	信号发生器频率准确度	$a_1 = 48.8 \text{ Hz}$	B	均匀	$\sqrt{3}$	$u_1 = 28.2 \text{ Hz}$	1.25	30.3 Hz
2	实时频谱仪分辨力	$a_2 = \pm 5 \text{ kHz}$	B	均匀	$\sqrt{3}$	$u_2 = 4.08 \text{ kHz}$	1.25	5.10 kHz
3	测量重复性	0.0 Hz	A	——	——	$u_3 = 0.0 \text{ Hz}$	1.25	0.0 Hz

2) 合成标准不确定度

以上各分量之间不相关，合成标准不确定度：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 5.1 \text{ kHz}$$

C.1.5 扩展不确定度

包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度 U 为：

$$U = ku_c = 11 \text{ kHz}$$

C.2 全捕获最小脉宽时的幅度比

C.2.1 测量模型

$$P_r = P_2 - P_1 \quad (\text{C.1})$$

式中：

P_r ——全捕获最小脉宽时的幅度比，dB；

P_2 ——脉冲调制模式下实时频谱仪的幅度示值，dBm；

P_1 ——连续波模式下实时频谱仪的幅度示值，dBm。

C.2.2 不确定度来源

不确定度来源如下：

- 峰值功率计功率测量不准引入的标准不确定度 $u_1(P_r)$ ；
- 信号发生器连续波和脉冲调制输出时的功率不一致引入的标准不确定度 $u_2(P_r)$ ；
- 实时频谱仪功率分辨力引入的标准不确定度 $u_3(P_r)$ ；
- 系统之间失配引入的标准不确定度 $u_4(P_r)$ ；
- 测量重复性引入的标准不确定度 $u_5(P_r)$ 。

C.2.3 标准不确定度评定

- 峰值功率计功率测量不准引入的标准不确定度 $u_1(P_r)$

按技术说明书，峰值功率计功率测量的误差限为 $\pm 0.30 \text{ dB}$ ，设测量值落在该区间内的概率分布为均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，由于峰值功率计进行了两次测量，因此由峰值功率计功率测量不准引入的标准不确定度分量 $u_1(P_r)$ 为：

$$u_1(P_r) = \sqrt{2} \times 0.30 \text{ dB} / \sqrt{3} = 0.24 \text{ dB}$$

- 信号发生器连续波和脉冲调制输出时的功率不一致引入的标准不确定度 $u_2(P_r)$

根据技术说明书或校准结果，信号发生器连续波和脉冲调制输出时的功率不一致为 0.10 dB ，为正态分布， $k = 2$ ，由于连续波和脉冲调制输出时的功率不一致引入的标准不确定度分量 $u_2(P_r)$ 为：

$$u_2(P_r) = 0.10 \text{ dB} / 2 = 0.05 \text{ dB}$$

- 实时频谱仪功率分辨力引入的标准不确定度 $u_3(P_r)$

实时频谱仪的功率分辨力为 0.01 dB ， $a_2 = \pm 0.005 \text{ dB}$ ，为均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，由于实时频谱仪进行了两次测量，因此由实时频谱仪功率分辨力引入的标准不确定度分量 $u_3(P_r)$ 为：

$$u_3(P_r) = \sqrt{2} \times 0.005 \text{ dB} / \sqrt{3} = 0.005 \text{ dB}$$

- 系统之间失配引入的不确定度 $u_4(P_r)$

在频率为 1 GHz 时，功率计和功分器输出端等效源驻波均小于 1.1 ，由于失配引入的误差限为 $\Delta_1 = \pm 4.34 \times 2 \times 0.05 \times 0.05 = 2.2\%$ ，即 $\Delta_1 = \pm 0.09 \text{ dB}$ ， Δ_1 在该区间内的概率分布为反正弦分布， $k = \sqrt{2}$ ，则由于功率计和功分器之间的失配引入的标准不确定度分量 $u_4(P_r)$ 为：

$$u_4(P_r) = 0.09 \text{ dB} / \sqrt{2} = 0.07 \text{ dB}$$

e) 测量重复性引入的不确定度 $u_5(P_r)$

短时间内对最小脉宽时的幅度比进行 10 次测量，测量结果见表 C.3。

表 C.3 全捕获最小脉宽时的幅度比的测量数据

测量列	测量值 dB
1	-0.58
2	-0.60
3	-0.57
4	-0.59
5	-0.59
6	-0.60
7	-0.57
8	-0.60
9	-0.59
10	-0.57

则单次测量结果的实验标准差为：

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0.01 \text{ dB}$$

标准不确定度用实验标准差表示，则

$$u_5(P_r) = 0.01 \text{ dB}$$

C.2.4 合成标准不确定度

1) 不确定度分量汇总

不确定度分量汇总见表 C.4。

表 C.4 全捕获最小脉宽时的幅度比不确定度分量汇总表

序号	不确定度分量					
	不确定度来源	分量	评定方法	分布	包含因子	标准不确定度
1	峰值功率计功率 测量不准	0.42 dB	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.24 dB
2	信号发生器连续波和脉冲调制 输出时的功率不一致	0.10 dB	B	正态	2	0.05 dB
3	实时频谱仪功率分辨率	0.005 dB	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.005 dB
4	系统之间失配	0.09 dB	B	反正弦	$\sqrt{2}$	0.07 dB
5	测量重复性	0.01 dB	A	——	——	0.01 dB

2) 合成标准不确定度

以上各分量之间不相关，合成标准不确定度：

$$u_c(P_r) = \sqrt{u_1^2(P_r) + u_2^2(P_r) + u_3^2(P_r) + u_4^2(P_r) + u_5^2(P_r)} = 0.26 \text{ dB}$$

C.2.5 扩展不确定度

包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度 $U(P_r)$ 为：

$$U(P_r) = k \times u_c(P_r) = 2 \times 0.26 \text{ dB} = 0.52 \text{ dB}$$

C.3 频率模板触发电平测量不确定度

C.3.1 测量模型

$$L_m = -10 \text{ dBm} - A_1 - L_1 \quad (\text{C.2})$$

式中：

L_m ——触发电平实测值，dBm；

A_1 ——衰减器衰减量，dB；

L_1 ——信号发生器的功率调整量，dB。

C.3.2 不确定度来源

- 1) 峰值功率计测量功率示值误差引入的标准不确定度 $u(P)$ ；
- 2) 功分器与实时频谱仪间失配误差引入的标准不确定度 $u_1(L_m)$ ；
- 3) 功分器与峰值功率计间失配误差引入的标准不确定度 $u_2(L_m)$ ；
- 4) 功分器功率对称性引入的标准不确定度 $u_3(L_m)$ ；
- 5) 衰减器的衰减值引入的标准不确定度 $u(A)$ ；
- 6) 信号发生器功率调整量引入的标准不确定度 $u_1(L_1)$ ；
- 7) 重复性引入的标准不确定度 $u_2(L_1)$ 。

C.3.3 标准不确定度评定

- a) 峰值功率计测量功率示值误差引入的标准不确定度 $u(P)$

峰值功率计是由功率指示器和功率传感器组成的，通常使用前需要使用其内置功率为 0 dBm、频率为 50 MHz 的参考源进行自校准。因此，功率计的测量误差由以下几部分组成：参考源输出电平最大允许误差 Δ_1 、峰值功率计探头线性误差 Δ_2 、峰值功率计探头校准因子误差 Δ_3 、自校准时功率传感器与参考源的失配误差 Δ_4 。根据功率计的技术指标：

- 1) 参考源输出电平最大允许误差 Δ_1 引入的标准不确定度 $u_1(P)$

参考源输出功率最大允许误差为 $\pm 0.017 \text{ dB}$ ，区间半宽度为 0.017 dB ，服从均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，标准不确定度 $u_1(P) = 0.01 \text{ dB}$ 。

- 2) 峰值功率计探头线性误差 Δ_2 引入的标准不确定度 $u_2(P)$

功率计线性误差为 $\pm 0.035 \text{ dB}$ ，区间半宽度为 0.035 dB ，服从均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，标准不确定度 $u_2(P) = 0.02 \text{ dB}$ 。

- 3) 峰值功率计探头校准因子误差 Δ_3 引入的标准不确定度 $u_3(P)$

根据峰值功率计的技术说明书，校准因子的测量不确定度为 0.42 dB ， $k=2$ ，标准不确定度 $u_3(P) = 0.21 \text{ dB}$ 。

4) 自校准时功率传感器与参考源的失配误差引入的标准不确定度 $u_4(P)$ 功率计输入端电压驻波比 ≤ 1.3 ，功率计内置参考源的输入端口驻波比 ≤ 1.1 ，失配误差限用下式估计：

$$\Delta_4 = 4.34 \times 2 \times |\Gamma_S| \times |\Gamma_U|$$

式中：

Δ_4 ——失配误差限，dB；

$|\Gamma_S|$ ——被测输出端反射系数的模值；

$|\Gamma_U|$ ——功率计输入端反射系数的模值。

根据仪表的技术指标得到： $\Delta_4 = 4.34 \times 2 \times |\Gamma_S| \times |\Gamma_U| = \pm 0.06$ dB，区间半宽度为 0.06 dB，服从反正弦分布， $k = \sqrt{2}$ 。 $u_4(P) = 0.04$ dB。

以上各分量之间相互独立，不相关，则

$$u(P) = \sqrt{u_1^2(P) + u_2^2(P) + u_3^2(P) + u_4^2(P)} = 0.22 \text{ dB}$$

b) 功分器与实时频谱仪间失配误差引入的标准不确定度 $u_1(L_m)$

功分器输出端口电压驻波比 ≤ 1.1 ，实时频谱仪输入端口电压驻波比 ≤ 2.0 ，失配误差限用下式估计：

$$\Delta_2 = \pm 4.34 \times 2 \times |\Gamma_S| \times |\Gamma_U|$$

根据仪表的技术指标得到： $\Delta_2 = \pm 4.34 \times 2 \times |\Gamma_S| \times |\Gamma_U| = \pm 0.09$ dB，区间半宽度为 0.09 dB，服从反正弦分布， $k = \sqrt{2}$ 。

$$u_1(L_m) = a_2/k = 0.06 \text{ dB}$$

c) 功分器与峰值功率计间失配误差引入的标准不确定度 $u_2(L_m)$

功分器输出端口 1 的电压驻波比 ≤ 1.1 ，功率传感器输入端口电压驻波比 ≤ 1.3 ，失配误差限用下式估计：

$$\Delta_3 = \pm 4.34 \times 2 \times |\Gamma_S| \times |\Gamma_U|$$

根据仪表的技术指标得到： $\Delta_3 = 4.34 \times 2 \times |\Gamma_S| \times |\Gamma_U| = \pm 0.02$ dB，区间半宽度为 0.02 dB，服从反正弦分布， $k = \sqrt{2}$ 。

$$u_2(L_m) = a_3/k = 0.01 \text{ dB}$$

d) 功分器功率对称性引入的标准不确定度 $u_3(L_m)$

根据功率分配器的校准证书，功率分配比的测量不确定度为 0.10 dB， $k = 2$ ，因此，其标准不确定度为：

$$u_3(L_m) = 0.05 \text{ dB}$$

e) 衰减器衰减值引入的标准不确定度 $u(A)$

根据衰减器的校准证书，衰减器的衰减值的测量不确定度为 0.10 dB， $k = 2$ ，因此，其标准不确定度为：

$$u(A) = 0.05 \text{ dB}$$

f) 信号发生器功率调整量引入的标准不确定度 $u_1(L_1)$

根据信号发生器说明书，信号发生器功率调整量引入的不确定度为 ± 0.02 dB，区间半宽度为 0.02 dB，服从均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，因此，其标准不确定度为：

$$u_1(L_1) = 0.01 \text{ dB}$$

g) 测量重复性引入的标准不确定度 $u_2(L_1)$

设置微波脉冲信号发生器的输出频率为 2 GHz，调整信号发生器输出，使得功率计测得功分器输出端口一的功率为 -10 dBm，然后增大衰减器的衰减值使得实时频谱仪实现频率模板触发，重复测量 10 次，测量结果见表 C.5。

表 C.5 实时频谱仪频率触发模板电平

测量次数	实时频谱仪的频率触发模板电平/dBm
1	-20.2
2	-20.1
3	-20.1
4	-20.2
5	-20.2
6	-20.2
7	-20.3
8	-20.2
9	-20.2
10	-20.2

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0.06 \text{ dB}$$

即 $u_2(L_1) = 0.06 \text{ dB}$ 。

C.3.4 合成标准不确定度

不确定度分量汇总表见表 C.6。

表 C.6 不确定度分量汇总表

序号	不确定度分量					
	不确定度来源	分量/dB	评定方法	分布	包含因子	标准不确定度符号及数值/dB
1	峰值功率计测量功率示值误差	0.22	—	—	—	0.22
2	功分器与实时频谱仪间的失配误差	0.09	B	反正弦	$\sqrt{2}$	0.06
3	功分器与峰值功率计间失配误差	0.02	B	反正弦	$\sqrt{2}$	0.01
4	功分器功率对称性	0.10	B	正态	2	0.05
5	衰减器衰减值	0.10	B	正态	2	0.05
6	信号发生器功率调整量	0.02	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.01
7	测量重复性	0.06	A	—	—	0.06

各分量不相关，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u^2(P) + u_1^2(L_m) + u_2^2(L_m) + u_3^2(L_m) + u^2(A) + u_1^2(L_1) + u_2^2(L_1)} = 0.25 \text{ dB}$$

包含因子取 $k=2$ ，扩展不确定度

$$U = k \times u_c = 0.50 \text{ dB} \quad (k=2)$$

