

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 1678—2017

射频和微波功率放大器校准规范

Calibration Specification for RF & Microwave Power Amplifiers

2017-11-20 发布

2018-02-20 实施

国家质量监督检验检疫总局 发布

射频和微波功率放大器

校准规范

Calibration Specification for

RF & Microwave Power Amplifiers

JJF 1678—2017

归口单位：全国无线电计量技术委员会

主要起草单位：中国航天科工集团二院 203 所

参加起草单位：中国信息通信研究院

本规范委托全国无线电计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

杨绪军（中国航天科工集团二院 203 所）

陈云梅（中国航天科工集团二院 203 所）

参加起草人：

周 峰（中国信息通信研究院）

刘 挺（中国航天科工集团二院 203 所）



目 录

引言	(II)
1 范围	(1)
2 术语和定义	(1)
3 概述	(1)
4 计量特性	(1)
4.1 频率范围	(1)
4.2 额定输出功率	(1)
4.3 最大输出功率	(1)
4.4 增益	(1)
4.5 增益平坦度	(1)
4.6 1 dB 压缩点输出功率	(2)
4.7 增益调整范围	(2)
4.8 谐波失真	(2)
4.9 三阶交调	(2)
4.10 杂散抑制	(2)
4.11 输入电压驻波比	(2)
4.12 噪声系数	(2)
5 校准条件	(2)
5.1 校准环境条件	(2)
5.2 校准用设备	(2)
6 校准项目和校准方法	(4)
6.1 校准项目	(4)
6.2 外观及工作正常性检查	(4)
6.3 额定输出功率	(4)
6.4 增益	(6)
6.5 增益平坦度	(7)
6.6 1 dB 压缩点输出功率	(7)
6.7 最大输出功率	(8)
6.8 增益调整范围	(8)
6.9 谐波失真及杂波抑制	(9)
6.10 三阶交调	(10)
6.11 噪声系数	(11)
6.12 输入电压驻波比	(11)
7 校准结果表达	(12)
8 复校时间间隔	(12)
附录 A 原始记录格式	(13)
附录 B 校准证书内页格式	(16)
附录 C 测量不确定度评定示例	(18)

引 言

本规范依据 JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》编写，相关术语及测量不确定度评定遵循 JJF 1001—2011《通用计量术语及定义》和 JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》。

本规范为首次发布。



射频和微波功率放大器校准规范

1 范围

本规范适用于频率范围 10 kHz~40 GHz、最大输出功率小于 65.5 dBm 的射频和微波功率放大器（以下简称为功率放大器）的校准。

2 术语和定义

2.1 最大输出功率 maximal output power

功率放大器在线性放大区输出的最大功率。

2.2 增益平坦度 gain flatness

在规定的工作频带内，用于描述功率放大器的增益起伏变化，通常用功率放大器的最大或最小增益对平均增益偏差的绝对值并冠以正、负号表示。

2.3 1 dB 压缩点输出功率 power output at 1 dB compression

功率放大器进入非线性区，其增益将随输入功率增加而下降，当某一频率的增益下降 1 dB 时，此时的输出功率为该频率点的 1 dB 压缩点输出功率。

2.4 三阶交调 third-order intermodulation

当功率放大器加两个互不产生增益压缩且输出功率相等的频率为 f_1 和 f_2 的信号时，将会出现频率为 $2f_1 - f_2$ 和 $2f_2 - f_1$ 的三阶交调信号。基波信号输出功率特性延长线与三阶交调特性延长线的交点，称为三阶交调。

3 概述

功率放大器分为固态放大器和行波管放大器，功率放大器一般由激励、推动、末级功放及输出滤波器、自动功率控制、输出保护电路等单元组成。

4 计量特性

4.1 频率范围

10 kHz~40 GHz。

4.2 额定输出功率

小于 65.5 dBm。

4.3 最大输出功率

小于 65.5 dBm。

4.4 增益

0 dB~80 dB。

4.5 增益平坦度

± (0.5 dB~12 dB)。

4.6 1 dB 压缩点输出功率

小于 65.5 dBm。

4.7 增益调整范围

0 dB~80 dB。

4.8 谐波失真

-60 dBc~+0 dBc。

4.9 三阶交调

0 dBm~75.5 dBm。

4.10 杂散抑制

-60 dBc~-20 dBc。

4.11 输入电压驻波比

1~2.0。

4.12 噪声系数

3 dB~15 dB。

5 校准条件

5.1 校准环境条件

- a) 环境温度：(23±5)℃；
- b) 相对湿度：≤80%；
- c) 供电电源：电压 (220±11) V，频率 (50±1) Hz；
- d) 其他：周围无影响校准正常工作的机械振动和电磁干扰。

5.2 校准用设备

5.2.1 信号源 I、II

频率范围：10 kHz~40 GHz；
输出功率范围：-110 dBm~+14 dBm；
幅度稳定度：优于 0.5%/10 min；
谐波失真：-65 dBc~-30 dBc。

5.2.2 标准功率计

频率范围：10 kHz~40 GHz；
功率量程：-30 dBm~+44 dBm；
测量不确定度：0.21 dB ($k=2$)。

5.2.3 监视功率计

频率范围：10 kHz~40 GHz；
功率量程：-70 dBm~+20 dBm；
测量不确定度：0.21 dB ($k=2$)。

5.2.4 标准中功率计

频率范围：10 kHz~40 GHz；

功率量程：+20 dBm~+65.5 dBm；
测量不确定度：0.1 dB~0.4 dB ($k=2$)。

5.2.5 衰减器

频率范围：10 kHz~40 GHz；
额定功率：1 W~3 500 W；
衰减量：20 dB~50 dB；
测量不确定度：0.1 dB~0.5 dB ($k=2$)。

5.2.6 频谱分析仪

频率范围：10 kHz~40 GHz；
幅度范围：-90 dBm~+20 dBm；
幅度测量最大允许误差： \pm (0.5 dB~1.0 dB)。

5.2.7 定向耦合器 I

频率范围：10 kHz~40 GHz；
耦合度：10 dB~60 dB；
方向性： \geq 20 dB。

5.2.8 定向耦合器 II

频率范围：10 kHz~40 GHz；
耦合度：10 dB~60 dB；
方向性： \geq 20 dB；
额定功率：1 W~3 500 W；
耦合度测量不确定度：0.1 dB~0.5 dB ($k=2$)。

5.2.9 负载

频率范围：10 kHz~40 GHz；
额定功率：1 W~3 500 W；
输入端口电压驻波比： $<$ 1.30。

5.2.10 功分器

频率范围：10 kHz~40 GHz；
对称性： \leq 0.5 dB。

5.2.11 合路器

频率范围：10 kHz~40 GHz；
对称性： \leq 0.5 dB。

5.2.12 噪声源

频率范围：100 kHz~40 GHz；
超噪比范围：-4.5 dB~+35 dB；
输出端口电压驻波比： $<$ 1.30。

5.2.13 噪声系数分析仪

频率范围：10 kHz~40 GHz；
噪声系数测量范围：0 dB~+35 dB；

最大允许误差： ± 0.15 dB；

输入端电压驻波比： < 1.5 。

5.2.14 矢量网络分析仪：

频率范围：10 MHz~40 GHz；

测量电压驻波比最大允许误差： $\pm 5\%$ 。

6 校准项目和校准方法

6.1 校准项目

功率放大器校准项目见表 1。

表 1 校准项目

序号	校准项目名称	条款
1	外观及工作正常性检查	6.2
2	额定输出功率	6.3
3	增益	6.4
4	增益平坦度	6.5
5	1 dB 压缩点输出功率	6.6
6	最大输出功率	6.7
7	增益调整范围	6.8
8	谐波失真及杂波抑制	6.9
9	三阶交调	6.10
10	噪声系数	6.11
11	输入电压驻波比	6.12

6.2 外观及工作正常性检查

检查被校功率放大器的各开关、按键等工作正常，不应有影响电气性能的机械损伤。被校功率放大器通电后应正常工作；按其技术说明书规定时间预热，预热后应工作正常；有自检功能的，应能通过自检。

所有测试仪器按其技术说明书规定时间预热。

6.3 额定输出功率

6.3.1 标准中功率计法

a) 按图 1 连接仪器。



图 1 标准中功率计法校准额定输出功率校准框图

b) 设置信号源的频率为被校功率放大器的起始频率，输出幅度为最小（通常为 -50 dBm），幅度步进为 0.1 dB；被校功率放大器可变增益设置为 100% 。

c) 如果标准中功率计有频率修正，需设置测量频率。

d) 增加信号源的输出幅度（应不超过被校功率放大器最大允许输入功率），当标准中功率计的读数 P_s 达到被校功率放大器的额定输出功率 P_{rated} 时，记录 P_s 于附录 A 表 A.1 中；如果信号源的输出幅度已经达到被校功率放大器的最大允许输入功率时，而被校功率放大器输出功率还无法达到其额定输出功率，或被校功率放大器输出功率进入饱和状态，则记录此时标准中功率计的读数 P_s 于附录 A 表 A.1 中。

e) 减小信号源的输出幅度至最小，按照被校功率放大器的工作频率范围，改变信号源的频率。

f) 重复 c) ~ e) 步骤，直至被校功率放大器的终止频率。

6.3.2 衰减器法

a) 按图 2 连接仪器。



图 2 衰减器法校准额定输出功率校准框图

b) 设置信号源的频率为被校功率放大器的起始频率，输出幅度为最小（通常为 -50 dBm），幅度步进为 0.1 dB；被校功率放大器可变增益设置为 100% 。

c) 在标准功率计上设置该频率点的校准因子或测量频率。

d) 根据被校功率放大器的额定输出功率 P_{rated} ，按公式（1）计算出标准功率计的指示功率 P_s 。

$$P_s = P_{\text{rated}} - A \quad (1)$$

式中：

P_s ——标准功率计的指示功率，dBm；

P_{rated} ——被校功率放大器的额定输出功率，dBm；

A ——衰减器的衰减量，dB。

e) 增加信号源的输出幅度（应不超过被校功率放大器最大允许输入功率），当标准功率计的读数达到 P_s 时，即为达到被校功率放大器的额定输出功率 P_{rated} ，记录 P_{rated} 于附录 A 表 A.1 中；如果信号源的输出幅度已经达到被校功率放大器的最大允许输入功率时，而被校功率放大器输出功率还无法达到其额定输出功率，或被校功率放大器输出功率进入饱和状态，则记录此时标准功率计的读数 P_s ，按公式（2）计算被校功率放大器的额定输出功率 P_{rated} ，记录于附录 A 表 A.1 中。

$$P_{\text{rated}} = A + P_s \quad (2)$$

f) 减小信号源的输出幅度至最小，按照被校功率放大器的工作频率范围，改变信号源的频率。

g) 重复 c) ~ f) 步骤，直至被校功率放大器的终止频率。

6.3.3 定向耦合器法

a) 按图 3 连接校准设备。

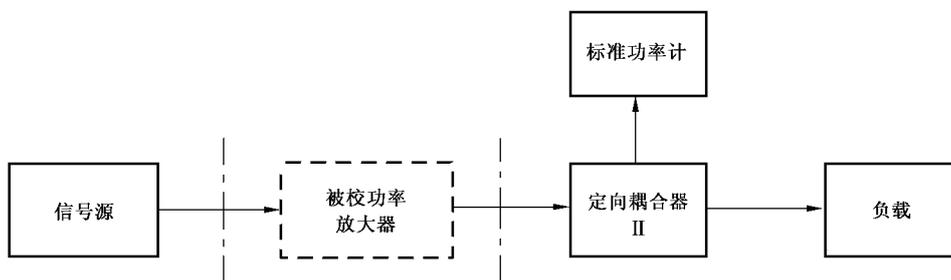


图 3 定向耦合器法校准额定输出功率校准框图

b) 设置信号源的频率为被校功率放大器的起始频率，输出幅度为最小（通常为 -50 dBm），幅度步进为 0.1 dB，被校功率放大器可变增益设置为 100% 。

c) 在标准功率计上设置功率计的偏置（offset）值（其值为定向耦合器的耦合度，dB）、校准因子或测量频率。

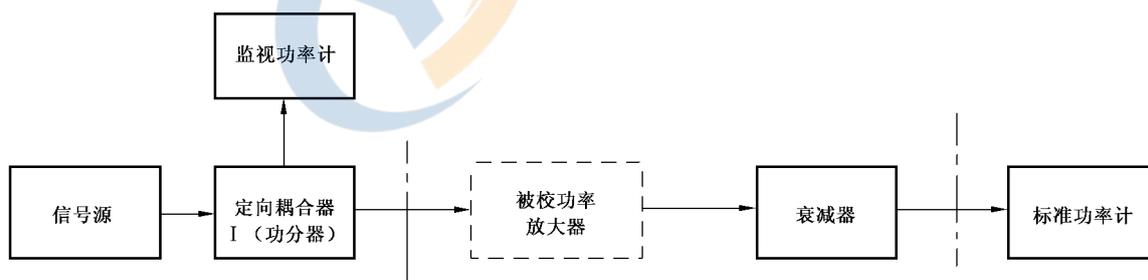
d) 增加信号源的输出幅度（应不超过被校功率放大器最大允许输入功率），当标准功率计的读数 P_s 达到被校功率放大器的额定输出功率 P_{rated} 时，记录 P_s 于附录 A 表 A.1 中。如果信号源的输出幅度已经达到被校功率放大器的最大允许输入功率，而被校功率放大器输出功率还无法达到其额定输出功率，或被校功率放大器输出功率进入饱和状态，则记录此时标准功率计的读数 P_s 于附录 A 表 A.1 中。

e) 减小信号源的输出幅度至 -50 dBm，按照被校功率放大器的工作频率范围，改变信号源的频率。

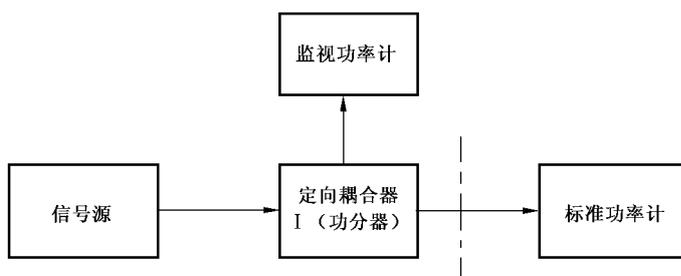
f) 重复 c) ~e) 步骤，直至被校功率放大器的终止频率。

6.4 增益

a) 按图 4 (a) 连接校准设备。



(a)



(b)

图 4 增益校准框图

b) 设置信号源的频率为被校功率放大器的起始频率，输出幅度为最小（通常为 -50 dBm），幅度步进为 0.1 dB，被校功率放大器可变增益设置为 100% 。

c) 在标准功率计上设置该频率点的校准因子或测量频率。

d) 根据公式 (3)，计算出被校功率放大器额定输出功率一半时的标准功率计的指示值 P_{s1} 。

$$P_{s1} = (P_{\text{rated}} - 3) - A \quad (3)$$

式中：

P_{s1} ——标准功率计指示值，dBm。

e) 增加信号源的输出幅度使标准功率计的指示值达到 P_{s1} ，或者设置被校功率放大器的输入功率为某特定值，记录标准功率计的读数 P_{s1} ，记录此时监视功率计的功率指示值 P_m ；将信号源的输出功率置 OFF 状态，将被校功率放大器（设置为 STANDBY 状态）和衰减器移出校准系统。

f) 按图 4 (b) 连接校准设备，将信号源的输出功率置 ON 状态，调整信号源的输出功率，使监视功率计的读数 P_m 不变，记录标准功率计的读数 P'_{s2} 。

g) 根据公式 (4) 计算被校功率放大器的增益 G

$$G = P_{s1} + A - P'_{s2} \quad (4)$$

式中：

G ——被校功率放大器的增益，dB；

P_{s1} ——被校功率放大器接入系统时，标准功率计的读数，dBm；

P'_{s2} ——被校功率放大器和衰减器移出系统时，标准功率计的读数，dBm；

A ——衰减器的衰减量，dB。

h) 将被校功率放大器的增益 G 记录在附录 A 表 A.2 中。

i) 减小信号源的输出幅度至 -50 dBm，按照被校功率放大器的工作频率范围，改变信号源的频率；

j) 重复 c) ~ i) 步骤，直至被校功率放大器的终止频率。

6.5 增益平坦度

a) 根据 6.4 的校准结果，记录被校功率放大器工作频带内的最大增益 G_{max} 和最小增益 G_{min} 。

b) 根据公式 (5) 计算被校功率放大器工作频带内的增益平坦度 ΔG

$$\Delta G = \frac{G_{\text{max}} - G_{\text{min}}}{2} \quad (5)$$

式中：

ΔG ——增益平坦度，dB；

G_{max} ——最大增益，dB；

G_{min} ——最小增益，dB。

c) 将被校功率放大器的增益平坦度 ΔG 记录在附录 A 表 A.3 中。

6.6 1 dB 压缩点输出功率

a) 按图 5 连接仪器。

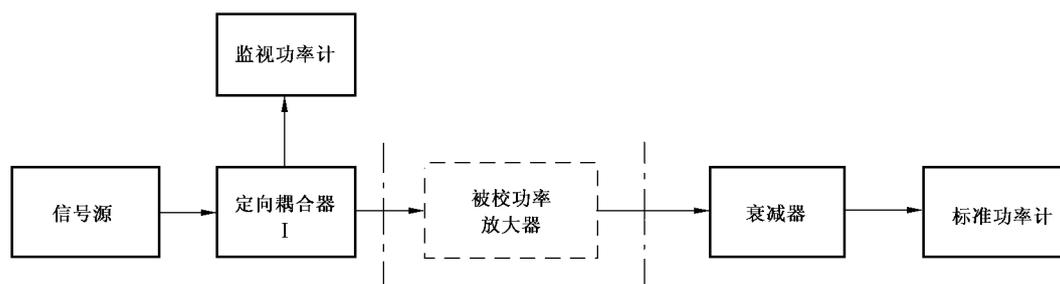


图5 1 dB压缩点输出功率校准框图

b) 设置信号源的频率为被校功率放大器的起始频率，输出幅度为最小（通常为 -50 dBm），幅度步进为 0.1 dB，被校功率放大器可变增益设置为 100% 。

c) 在标准功率计上设置该频率点的校准因子或测量频率。

d) 调整信号源的输出幅度（应不超过被校功率放大器最大允许输入功率），直到被校功率放大器的增益减小 1 dB时，记录标准功率计的读数 P'_s ，按公式（6）计算被校功率放大器的 1 dB压缩点输出功率 $P_{1\text{ dB}}$ 。

$$P_{1\text{ dB}} = P'_s + A \quad (6)$$

式中：

$P_{1\text{ dB}}$ —— 1 dB压缩点输出功率，dBm；

P'_s ——标准功率计的读数，dBm。

e) 将被校功率放大器的 1 dB压缩点的输出功率记录在附录A表A.4中。

f) 减小信号源的输出幅度至 -50 dBm，按照被校功率放大器的工作频率范围，改变信号源的频率。

g) 重复c)～f)步骤，直至被校功率放大器的终止频率。

6.7 最大输出功率

a) 重复6.6中的a)～e)，减少信号源的输出幅度使得监视功率计读数减少 1 dB，此时标准功率计的读数为 P_s ，被校功率放大器的最大输出功率 P_{max} 按公式（7）计算，记录 P_{max} 在附录A表A.5中。

$$P_{\text{max}} = P_s + A \quad (7)$$

b) 减小信号源的输出幅度至 -50 dBm，按照被校功率放大器的工作频率范围，改变信号源的频率。

c) 重复a)～b)步骤，直至被校功率放大器的终止频率。

6.8 增益调整范围

6.8.1 功率计法

a) 按图6连接仪器。

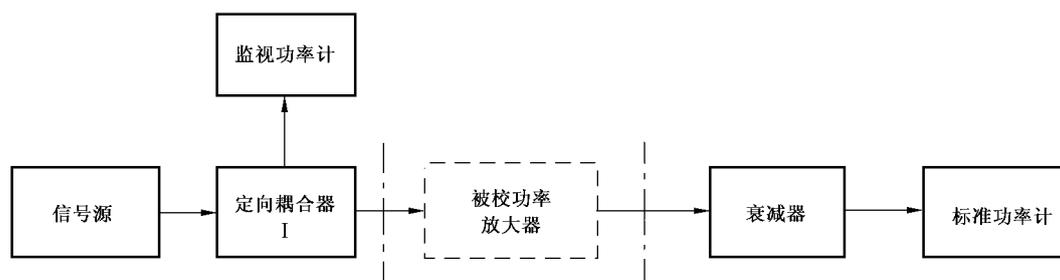


图6 功率计增益调整范围校准框图

- b) 设置信号源的频率为被校功率放大器的起始频率，输出幅度为最小（通常为 -50 dBm），幅度步进为 0.1 dB。
- c) 将被校功率放大器的可变增益设置为最小或 0% 。
- d) 将标准功率计的偏置设置为： A （衰减器的衰减量，单位：dB），并在标准功率计中设置校准因子（或设置功率计的测量频率）。
- e) 增加信号源的输出幅度至标准功率计的读数稳定时，观察监视功率计的功率指示值 P_m 和标准功率计的功率指示值 P_s ，记录此时标准功率计的读数 P_s 。
- f) 维持监视功率计指示功率 P_m 不变，将被校功率放大器的可变增益设置为最大或 100% ，记录此时标准功率计的读数 P'_s 。
- g) 根据公式（8）计算被校功率放大器的增益调整范围 G_{adj}

$$G_{adj} = P'_s - P_s \quad (8)$$

式中：

G_{adj} ——增益调整范围，dB；

P'_s ——被校功率放大器的增益设置至最大值时，标准功率计的读数，dBm。

P_s ——被校功率放大器的增益设置为最小或零时，标准功率计的读数，dBm。

h) 将计算的结果记录在附录 A 表 A.6 中。

i) 减小信号源的输出幅度至 -50 dBm，按照被校功率放大器的工作频率范围，改变信号源的频率。

j) 重复 c) ~i) 步骤，直至被校功率放大器的终止频率，完成所要求频点的增益调整范围的校准。

6.8.2 矢量网络分析仪法

a) 按图 7 连接仪器。

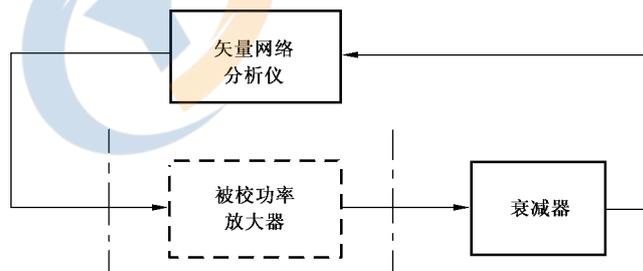


图 7 矢量网络分析仪增益调整范围校准框图

b) 设置矢量网络分析仪输出功率（注意，在设置矢量网络分析仪的输出功率时，不得超过被校功率放大器达到额定输出功率时的输入功率）、频率范围。

c) 将被校功率放大器的可变增益设置为最小或 0% ，并对矢量网络分析仪进行 S_{21} 直通校准。

d) 将被校功率放大器的可变增益设置为最大或 100% ，在矢量网络分析仪读取各个频率点的增益值记录于附录 A 表 A.6 中。

6.9 谐波失真及杂波抑制

a) 按图 8 连接仪器。

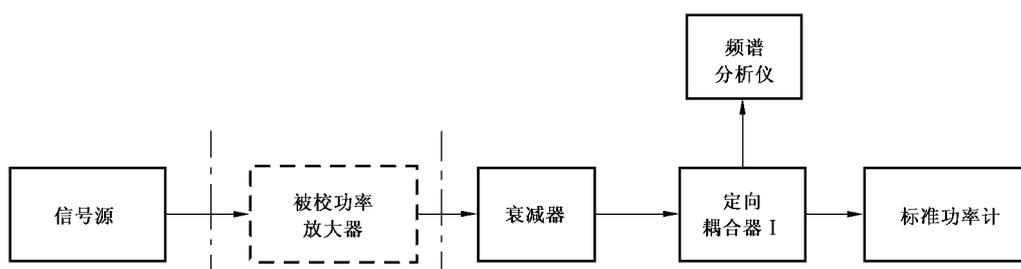


图 8 谐波失真及杂波抑制校准框图

b) 设置信号源的频率为被校功率放大器的起始频率，输出幅度为最小（通常为 -50 dBm），幅度步进为 0.1 dB，被校功率放大器可变增益设置为 100% 。

c) 根据被校功率放大器的工作频率，设置频谱分析仪的参考电平、中心频率、跨度（SPAN）、分辨力带宽等参数。

d) 调整信号源的输出幅度，通过标准功率计监视被校功率放大器的输出功率，当被校功率放大器输出达到说明书所要求的额定功率时，在频谱分析仪上分别读取二次谐波、三次谐波与基波的幅度差，即为谐波失真。

e) 将被校功率放大器的谐波失真记录在附录 A 表 A.7 中。

f) 同时，改变频谱分析仪的跨度（SPAN）、分辨力带宽等参数；在频谱分析仪上读取最大杂散谱与基波的幅度差，即为杂波抑制。

g) 将被校功率放大器的杂波抑制记录在附录 A 表 A.7 中。

h) 减小信号源的输出幅度至 -50 dBm，按照被校功率放大器的工作频率范围，改变信号源的频率。

i) 重复 c) ~h) 步骤，完成所要求频点的谐波失真及杂波抑制的校准。

6.10 三阶交调

a) 按图 9 连接仪器。

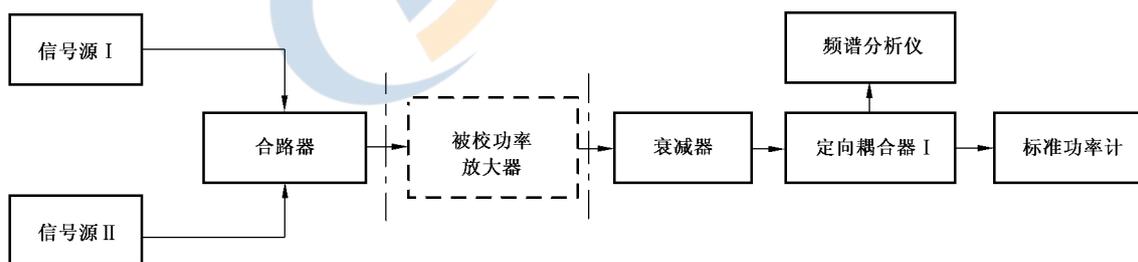


图 9 三阶交调校准框图

b) 根据被校功率放大器的工作频率 f_0 ，分别设置信号源 I 的频率 f_1 为 $f_0 + \Delta$ ，信号源 II 的频率 f_2 为 $f_0 - \Delta$ （通常 $\Delta \leq 10$ MHz）。

c) 根据被检功率放大器的工作频率，设置频谱分析仪参考电平、中心频率、跨度（SPAN）、分辨带宽等参数。

d) 分别打开信号源 I 和信号源 II 的输出，调整信号源输出功率（应不超过被校功率放大器最大允许输入功率），通过标准功率计测量被校功率放大器的输出功率 P_0 ，使得被校功率放大器的输出功率达到 1 dB 压缩输出功率，此时可以同时看到基波信号和三阶交调信号。

e) 在频谱分析仪上测量基波信号 f_1 和 f_2 及三阶交调信号 ($2f_1 - f_2$ 及 $2f_2 - f_1$) 频谱幅度, 记录此时频谱分析仪中频率 f_1 和 f_2 中较大的频谱幅度 P'_0 以及三阶交调频谱幅度 P_{s3} 。

f) 根据公式 (9) 计算被校功率放大器的三阶交调

$$\text{IMD}_3 = P_{s3} - P'_0 \quad (9)$$

式中:

P'_0 ——基波频谱幅度, dBm;

P_{s3} ——三阶交调频谱幅度, dBm。

g) 将被校功率放大器的三阶交调功率值记录在附录 A 表 A. 8 中。

h) 减小信号源的输出幅度至 -50 dBm。

i) 按照被校功率放大器的要求, 改变信号源的频率重复操作 b) ~h) 步骤, 完成所要求频点的三阶交调的校准。

6.11 噪声系数

噪声系数的测量通常用于输出功率 30 dBm 以下的功率放大器的测试。

a) 按图 10 连接仪器。



图 10 噪声系数校准框图

b) 将噪声系数分析仪初始复位; 并将噪声源的超噪比 ENR 输入到噪声系数分析仪中。

c) 依据被校功率放大器测量频率选择噪声系数分析仪测量模式: 当频率在噪声系数分析仪频率范围内时, 噪声系数分析仪选择默认模式, 超出噪声系数分析仪频率范围时, 选择频率扩展模式并设置扩展模块的本振频率参数。

d) 在噪声系数分析仪上设置校准起始频率、终止频率、步长或测量频点数。

e) 按噪声系数分析仪校准键执行校准。

f) 将噪声源接入被校功率放大器的输入端, 被校功率放大器的输出端接入到噪声系数分析仪, 执行测量并记录噪声系数校准结果在附录 A 表 A. 9 中。

g) 被校功率放大器校准量为等效噪声温度时, 将噪声系数分析仪测量量设置为等效噪声温度, 记录校准结果在附录 A 表 A. 9 中。

6.12 输入电压驻波比

a) 按图 11 连接仪器。



图 11 输入电压驻波比校准框图

- b) 根据被校功率放大器的频率范围设置矢量网络分析仪的测量频率点。
- c) 设置矢量网络分析仪的输出功率，应不超过被校功率放大器最大允许输入功率（或被校功率放大器说明书的要求，设置输入功率）。
- d) 将矢量网络分析仪进行校准，校准完成后按图 11 连接仪器进行输入电压驻波比测量。
- e) 在矢量网络分析仪上读取测量值，将测量结果记录在附录 A 表 A.10 中。

7 校准结果表达

校准证书或校准报告应至少包含以下信息：

- 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说明；
- p) 未经实验室书面批准，不得部分复制证书的声明。

8 复校时间间隔

功率放大器的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

原始记录格式

表 A.1 额定输出功率

频率 f GHz	输入功率 P dBm	输出功率 P_s dBm	额定输出功率 P_{rated} dBm	$U(k=2)$

表 A.2 增益

频率 f GHz	输入功率 P_{in} dBm	功率 P_{s1} dBm	功率 P_{s2} dBm	增益 G dB	$U(k=2)$

表 A.3 增益平坦度

最大增益 G_{max} dB	最小增益 G_{min} dB	增益平坦度 ΔG dB	$U(k=2)$

表 A.4 1 dB 压缩点输出功率

频率 f GHz	输入功率 P_{in} dBm	1 dB 压缩点输出功率 $P_{1\text{dB}}$ dBm	$U(k=2)$

表 A.5 最大输出功率

频率 f GHz	输入功率 P_{in} dBm	最大输出功率 P_{max} dBm	$U (k=2)$

表 A.6 增益调整范围

频率 f GHz	增益调整范围 G_{adj} dB	$U (k=2)$

表 A.7 谐波失真及杂波抑制

频率 f GHz	二次谐波失真 dBc	三次谐波失真 dBc	杂波抑制 dBc	$U (k=2)$

表 A.8 三阶交调

频率 f GHz	三阶交调 dBm	$U (k=2)$

表 A.9 噪声系数

频率 f GHz	噪声系数 dB	$U (k=2)$

表 A.10 输入电压驻波比

输入端口	电压驻波比 VSWR	$U (k=2)$



附录 B

校准证书内页格式

表 B.1 额定输出功率

频率 f GHz	输入功率 P dBm	输出功率 P_s dBm	$U(k=2)$

表 B.2 增益

频率 f GHz	增益 G dB	$U(k=2)$

表 B.3 增益平坦度

频率范围	增益平坦度 ΔG dB	$U(k=2)$

表 B.4 1 dB 压缩点输出功率

频率 f GHz	输入功率 P_{in} dBm	1 dB 压缩点输出功率 P_{1dB} dBm	$U(k=2)$

表 B.5 最大输出功率

频率 f GHz	输入功率 P_{in} dBm	最大输出功率 P_{max} dBm	$U(k=2)$

表 B.6 增益调整范围

频率 f GHz	增益调整范围 G_{adj} dB	$U (k=2)$

表 B.7 谐波失真及杂波抑制

频率 f GHz	二次谐波失真 dBc	三次谐波失真 dBc	杂波抑制 dBc	$U (k=2)$

表 B.8 三阶交调

频率 f GHz	三阶交调 dBm	$U (k=2)$

表 B.9 噪声系数

频率 f GHz	噪声系数 dB	$U (k=2)$

表 B.10 输入电压驻波比

输入端口	电压驻波比 VSWR	$U (k=2)$

附录 C

测量不确定度评定示例

C.1 中功率计法测量额定输出功率测量不确定度评定

C.1.1 测量模型

将标准中功率计接于放大器输出端，记录下标准中功率计的读数 P_s ，就可以得出被校功率放大器的输出功率。

$$P_{\text{rated}} = P_s \quad (\text{C.1})$$

式中：

P_{rated} —— 被校功率放大器的输出功率电平，W；

P_s —— 标准中功率计的功率读数，W。

考虑到校准测试中失配、重复性引入的不确定度分量 $u(M)$ 、 $u(D)$ 独立不相关，可以得到被校功率放大器输出功率电平的相对合成标准不确定度

$$u_c(P_{\text{rated}}) = \sqrt{[u(P_s)]^2 + [u(M)]^2 + [u(D)]^2} \quad (\text{C.2})$$

C.1.2 标准不确定度评定

被校功率放大器额定输出功率的测量结果不确定度评定选择频率为 2 GHz，功率电平为 100 W。

C.1.2.1 标准中功率计功率读数引入的相对标准不确定度分量 $u(P_s)$

标准中功率计功率读数的最大允许误差为 $\pm 2.0\%$ ，由此引入的不确定度分量按 B 类方法进行评定，其测量结果服从均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则

$$u(P_s) = 1.2\%$$

C.1.2.2 失配引入的相对标准不确定度分量 $u(M)$

失配引入的最大误差限为 $2 |\Gamma_u| |\Gamma_s|$ ，其中， $|\Gamma_s| = 0.13$ ， $|\Gamma_u| = 0.13$ 。按 B 类方法评定， M 的可能值服从反正弦分布，包含因子 $k(M) = \sqrt{2}$ ，其相对标准不确定度 $u(M)$ 为

$$u_2(M) = \frac{U_2(M)}{k} = \sqrt{2} |\Gamma_u| |\Gamma_s| = 2.4\%$$

C.1.2.3 测量重复性引入的相对标准不确定度分量 $u(D)$

测量重复性引入的相对标准不确定度分量按 A 类评定，其引入的相对标准不确定度分量为

$$u(D) = s_n(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} = 0.5\%$$

C.1.3 合成标准不确定度

表 C.1 不确定度分量一览表

不确定度分量	来源	评定方法	分布	k 值	相对标准不确定度	灵敏系数
$u(P_s)$	功率读数	B类	均匀	$\sqrt{3}$	1.2%	1
$u(M)$	失配	B类	反正弦	$\sqrt{3}$	2.4%	1
$u(D)$	重复性	A类			0.5%	

则相对合成标准不确定度为

$$u_c(P_{\text{rated}}) = \sqrt{[u(P_s)]^2 + [u(M)]^2 + [u(D)]^2} = 2.7\%$$

C.1.4 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U(P_{\text{rated}}) = 5.4\% \quad (0.23 \text{ dB})$$

C.2 衰减器法测量额定输出功率测量不确定度评定

C.2.1 测量模型

$$P_{\text{rated}} = A + P_s \quad (\text{dBm}) \quad (\text{C.3})$$

$$A' = 10^{A/10} \quad (\text{C.4})$$

式中：

P_s ——标准功率测量值，dBm；

A ——衰减器的衰减量，dB；

A' ——倍数表示的衰减器的衰减量。

额定输出功率可表示为

$$P_{\text{rated}} = A' \cdot P_s \quad (\text{mW}) \quad (\text{C.5})$$

由于各不确定度分量独立不相关，根据不确定度传播律，被校功率放大器输出功率电平 P 的相对合成标准不确定度可表示为

$$\begin{aligned} u_c(P_{\text{rated}}) &= \frac{u'_c(P_{\text{rated}})}{P_{\text{rated}}} \\ &= \sqrt{\left[\frac{c_1 u'(A')}{A'} \right]^2 + \left[\frac{c_2 u'(P_s)}{P_s} \right]^2 + u^2(M) + u^2(D)} \\ &= \sqrt{[c_1 u(A')]^2 + [c_2 u(P_s)]^2 + u^2(M) + u^2(D)} \end{aligned} \quad (\text{C.6})$$

式中：

$u(A')$ ——输入量 A 的相对标准不确定度；

$u(P_s)$ ——输入量 P_s 的相对标准不确定度；

$u(M)$ ——失配引入的相对不确定度分量；

$u(D)$ ——测量重复性引入的相对不确定度分量；

c_1 、 c_2 ——分别为输入量 A 、 P_s 的灵敏系数，均为 1。

$$u_c(P_{\text{rated}}) = \sqrt{[u(A')]^2 + [u(P_s)]^2 + u^2(M) + u^2(D)} \quad (\text{C.7})$$

C.2.2 标准不确定度评定

被校功率放大器额定输出功率的测量结果不确定度评定选择频率为 2 GHz，功率电平为 100 W。

C.2.2.1 衰减器衰减量引入的相对标准不确定度分量 $u(A')$

a) 衰减器的衰减量射频频定标不准引入的相对标准不确定度分量

衰减器衰减量由衰减标准装置定标，测量不确定度为 $U_1(A') = 1.4\%$ 。由此引入的不确定度分量按 B 类方法进行评定，包含因子 $k=2$ 。因此，此项相对标准不确定度分量为

$$u_1(A') = \frac{U_1(A')}{2} = 0.7\%$$

b) 功率电平对衰减器衰减量的影响引入的相对标准不确定度分量

衰减器衰减量的功率系数为 0.001 2 dB/W，由此引入的不确定度分量按 B 类方法进行评定，其取值服从均匀分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ 。功率电平为 100 W 时，此项相对标准不确定度分量为

$$u_2(A') = \frac{U_2(A')}{\sqrt{3}} = 1.7\%$$

c) 温度对衰减器衰减量的影响引入的相对标准不确定度分量

衰减器衰减量的温度系数为 0.000 4 dB/(dB·°C)，由此引入的不确定度分量按 B 类方法进行评定，其取值服从均匀分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ 。衰减器温度变化 10 °C、衰减量 20 dB 时，此项相对标准不确定度分量为

$$u_3(A') = \frac{U_3(A')}{\sqrt{3}} = 1.1\%$$

各测量不确定度分量不相关，因此，衰减器衰减量引入的相对标准不确定度为

$$u(A') = \sqrt{u_1^2(A') + u_2^2(A') + u_3^2(A')} = 2.2\%$$

C.2.2.2 标准功率计引入的相对标准不确定度分量 $u(P_s)$

技术说明书给出的直流替代功率准确度为 $\pm 0.5\%$ ，因此，其相对扩展不确定度为 0.5%。由此引入的不确定度分量按 B 类方法进行评定，其测量结果服从均匀分布，包含因子 $k=\sqrt{3}$ ，则

$$u(P_s) = 0.29\%$$

C.2.2.3 失配引入的相对标准不确定度分量 $u(M)$

校准系统中插入衰减器引入的失配因子为

$$M = |1 - S_{22}\Gamma_s|^2 |1 - \Gamma_G(S_{11} + \Gamma_s)|^2$$

由此引入的最大误差限为 $2(|S_{22}||\Gamma_s| + |\Gamma_G||S_{11}| + |\Gamma_G||\Gamma_s|)$ ，在 2 GHz， $|S_{22}| = 0.03$ ， $|S_{11}| = 0.03$ ， $|\Gamma_G| = 0.20$ ， $|\Gamma_s| = 0.03$ ，按 B 类方法评定， M 的可能值服从反正弦分布，包含因子 $k(M) = \sqrt{2}$ ，其相对标准不确定度 $u(M)$ 为

$$u(M) = \frac{U(M)}{k} = \sqrt{2} (|S_{22}||\Gamma_s| + |\Gamma_G||S_{11}| + |\Gamma_G||\Gamma_s|) = 1.8\%$$

C. 2. 2. 4 测量重复性引入的相对标准不确定度分量 $u(D)$

测量重复性引入的相对标准不确定度分量按 A 类评定, 2 GHz 时其引入的相对标准不确定度分量为

$$u(D) = s_n(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} = 0.2\%$$

C. 2. 3 合成标准不确定度

表 C. 2 不确定度分量一览表

不确定度分量	来源	评定方法	分布	k 值	相对标准不确定度	灵敏系数
$u(A')$	衰减量	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	2.2%	1
$u(P_s)$	标准功率计直流替代功率	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	0.29%	1
$u(M)$	失配	B 类	反正弦	$\sqrt{2}$	1.8%	1
$u(D)$	重复性	A 类			0.2%	

则相对合成标准不确定度为

$$u_c(P_{\text{rated}}) = \sqrt{[u(A')]^2 + [u(P_s)]^2 + u^2(M) + u^2(D)} = 2.9\%$$

C. 2. 4 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$, 则扩展不确定度为

$$U(P_{\text{rated}}) = 5.8\% \quad (0.25 \text{ dB})$$

C. 3 增益测量不确定度评定

C. 3. 1 测量模型

被校功率放大器的增益为

$$G = P_{s1} + A - P'_{s2} = A + (P_{s1} - P'_{s2}) = A + R_{12} \quad (\text{C. 8})$$

式中:

G ——被校功率放大器的增益, dB;

P_{s1} ——被校功率放大器接入系统时, 标准功率计的读数, dBm;

P'_{s2} ——被校功率放大器和衰减器移出系统时, 标准功率计的读数, dBm;

R_{12} ——被校功率放大器接入系统和移出时, 标准功率计比值, dB。

功率放大器的增益线性可表示为

$$G' = A' \cdot R' \quad (\text{C. 9})$$

由于各不确定度分量独立不相关, 根据不确定度传播律, 被校功率放大器增益的相对合成标准不确定度为

$$\begin{aligned} u_c(G') &= \frac{u'_c(G')}{G'} \\ &= \sqrt{\left[\frac{c_1 u'(A')}{A'}\right]^2 + \left[\frac{c_2 u'(R'_{12})}{R'_{12}}\right]^2 + u^2(M) + u^2(D)} \\ &= \sqrt{[c_1 u(A')]^2 + [c_2 u(R'_{12})]^2 + u^2(M) + u^2(D)} \end{aligned} \quad (\text{C. 10})$$

式中：

$u(A')$ ——输入量 A' 的相对标准不确定度；

$u(R')$ ——输入量 R' 的相对标准不确定度；

c_1 、 c_2 ——分别为输入量 A' 、 R' 的灵敏系数，均为 1。

被校功率放大器增益的相对合成标准不确定度

$$u_c(G') = \sqrt{[u(A')]^2 + [u(R')_{12}]^2 + u^2(M) + u^2(D)} \quad (\text{C. 11})$$

C. 3. 2 标准不确定度评定

被校功率放大器增益的测量结果不确定度评定选择频率为 2 GHz，功率电平为 100 W。

C. 3. 2. 1 衰减器衰减量引入的相对标准不确定度分量 $u(A')$

衰减器衰减量引入的测量不确定度分为三项：衰减量定标、功率系数、温度系数。此项相对标准不确定度为

$$u(A') = 2.2\%$$

C. 3. 2. 2 标准小功率计功率比值 R 引入的相对标准不确定度分量 $u(R')$

标准小功率计功率比值 R 由功率计线性和分辨力决定，由于其校准时工作在线性区，因此，其相对扩展不确定度为 0.5%。由此引入的不确定度分量按 B 类方法进行评定，其测量结果服从均匀分布，包含因子 $k = \sqrt{3}$ ，则

$$u(R') = 0.29\%$$

C. 3. 2. 3 失配引入的相对标准不确定度分量 $u(M)$

a) 校准系统中插入衰减器引入的失配因子为

$$M = |1 - S_{22}\Gamma_s|^2 |1 - \Gamma_u(S_{11} + \Gamma_s)|^2$$

由此引入的最大误差限为 $2(|S_{22}||\Gamma_s| + |\Gamma_u||S_{11}| + |\Gamma_u||\Gamma_s|)$ ，在 2 GHz， $|S_{22}| = 0.03$ ， $|S_{11}| = 0.03$ ， $|\Gamma_u| = 0.20$ ， $|\Gamma_s| = 0.03$ ，按 B 类方法评定， M 的可能值服从反正弦分布，包含因子 $k(M) = \sqrt{2}$ ，其相对标准不确定度 $u(M)$ 为

$$u_1(M) = \frac{U_1(M)}{k} = \sqrt{2} (|S_{22}||\Gamma_s| + |\Gamma_u||S_{11}| + |\Gamma_u||\Gamma_s|) = 1.8\%$$

b) 标准功率计与等效信号源之间的失配引入的相对标准不确定度

由此引入的最大误差限为 $2|\Gamma_G||\Gamma_s|$ ，2 GHz 时， $|\Gamma_s| = 0.03$ ， $|\Gamma_G| = 0.05$ ，按 B 类方法评定， M 的可能值服从反正弦分布，包含因子 $k(M) = \sqrt{2}$ ，其相对标准不确定度 $u_2(M)$ 为

$$u_2(M) = \frac{U_2(M)}{k} = \sqrt{2} |\Gamma_G||\Gamma_s| = 2.1\%$$

两项失配之间相关，假定两者之间正强相关，则失配引入的相对标准不确定度为

$$u(M) = u_1(M) + u_2(M) = 2.0\%$$

C. 3. 2. 4 测量重复性引入的相对标准不确定度分量 $u(D)$

测量重复性引入的相对标准不确定度分量按 A 类评定，其引入的相对标准不确定

度分量为

$$u(D) = s_n(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} = 0.2\%$$

C.3.3 合成标准不确定度

表 C.3 不确定度分量一览表

不确定度分量	来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度分量	灵敏系数
$u(A')$	衰减量	B类	均匀	$\sqrt{3}$	2.2%	1
$u(R')$	标准小功率计功率比值	B类	均匀	$\sqrt{3}$	0.29%	1
$u(M)$	失配	B类	反正弦	$\sqrt{2}$	2.0%	1
$u(D)$	重复性	A类			0.2%	

则相对合成标准不确定度为：

$$u_c(G') = \sqrt{[u(A')]^2 + [u(R'_{12})]^2 + u^2(M) + u^2(D)} = 3.0\%$$

C.3.4 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度为

$$U(G) = k \cdot u_c(G) = 6.0\% \quad (0.26 \text{ dB})$$

C.4 噪声系数测量不确定度评定

C.4.1 测量模型

$$NF = ENR + y \quad (\text{C.12})$$

式中：

NF —— 测量结果，dB；

ENR —— 标准噪声源的超噪比，dB；

y —— 噪声系数测量误差，dB。

灵敏系数

$$\begin{cases} c_1 = c(ENR) = \frac{\partial(NF)}{\partial(ENR)} = 1 \\ c_2 = c(y) = \frac{\partial(NF)}{\partial(y)} = 1 \end{cases} \quad (\text{C.13})$$

由于各不确定度分量不相关，根据不确定度传播律，被校功率放大器噪声系数的相对合成标准不确定度为

$$u_c(NF) = \sqrt{[c_1 u(ENR)]^2 + [c_2 u(y)]^2 + u^2(M) + u^2(D)} \quad (\text{C.14})$$

式中：

$u(ENR)$ —— 输入量 ENR 的相对标准不确定度；

$u(y)$ —— 输入量 y 的相对标准不确定度；

$u(M)$ —— 失配引起的不确定度；

$u(D)$ ——测量重复性引入的相对不确定度分量。

C.4.2 不确定度评定

C.4.2.1 噪声源超噪比引入的不确定度 u_1

标准噪声源超噪比引入的不确定度由 B 类评定，由上级检定证书可知噪声源超噪比的扩展不确定度为 0.2 dB， $k=2$ 。则

$$u_1 = 0.2 \text{ dB} / 2 = 0.1 \text{ dB}$$

C.4.2.2 噪声系数分析仪测量不准确引入的不确定度 u_2

噪声系数分析仪技术说明书给出的技术指标：噪声系数测量不确定度小于 0.10 dB，由此引入的不确定度按 B 类评定， $k=2$ 。则

$$u_2 = 0.1 \text{ dB} / 2 = 0.05 \text{ dB}$$

C.4.2.3 噪声源与被测件之间的失配引入的不确定度 u_3

噪声源与被测件之间的连接存在着失配。噪声源的输出电压驻波比小于 1.15，被测件的输入端的电压驻波比小于 2.00。失配误差极限为：0.11 dB。

由此引入的不确定度 B 类评定，取 $k = \sqrt{2}$ （反正弦分布），则

$$u_3 = 0.11 \text{ dB} / \sqrt{2} = 0.078 \text{ dB}$$

C.4.2.4 测量重复性引入的不确定度 $u(D)$

测量重复性引入的相对标准不确定度分量按 A 类评定，其引入的相对标准不确定度分量为：

$$u(D) = s_n(x) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} = (0.022 \sim 0.031) \text{ dB}$$

C.4.3 合成标准不确定度

表 C.4 测量不确定度分量一览表

不确定度分量	不确定度来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度/dB
u_1	噪声源超噪比	B	正态	2	0.1
u_2	噪声系数分析仪测量不准确	B	正态	2	0.05
u_3	噪声源与被测件之间的失配	B	反正弦	$\sqrt{2}$	0.078
$u(D)$	测量重复性	A	—		0.022~0.031

则合成标准不确定度为

$$u_c(F) = \sqrt{[c_1 u(\text{ENR})]^2 + [c_2 u(Y)]^2 + u^2(M) + u^2(D)} = 0.190 \text{ dB} \sim 0.195 \text{ dB}$$

C.4.4 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，则扩展不确定度为

$$U(F) = k u_c(F) = 0.4 \text{ dB}$$