



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 1460-XXXX

噪声系数分析仪校准规范

Calibration Specification of Noise Figure Analyzer

(征求意见稿)

XXXX-XX-XX 发布

XXXX-XX-XX 实施

国家市场监督管理总局 发布

噪声系数分析仪校准规范

Calibration Specification of
Noise Figure Analyzer

JJF 1460-XXXX
代替 JJF 1460—2014

归口单位：全国无线电计量技术委员会

主要起草单位：北京无线电计量测试研究所

中国计量科学研究院

参加起草单位：中电科思仪科技股份有限公司

海军计量测试研究所

军事航天部队装备部装备保障队

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：

胡 瑜（北京无线电计量测试研究所）

张 萌（北京无线电计量测试研究所）

梁伟军（中国计量科学研究院）

参加起草人：

陈晋龙（北京无线电计量测试研究所）

宋青娥（中电科思仪科技股份有限公司）

闫道广（海军计量测试研究所）

何 平（军事航天部队装备部装备保障队）

目 录

引 言..... II

1 范围..... 1

2 概述..... 1

3 计量特性..... 1

 3.1 频率..... 1

 3.2 噪声系数..... 1

 3.3 增益..... 1

 3.4 本机噪声系数..... 1

 3.5 Y 系数抖动 2

 3.6 噪声源驱动电压..... 2

 3.7 输入端口反射系数模值..... 2

4 校准条件..... 2

 4.1 校准环境条件..... 2

 4.2 校准用设备..... 2

5 校准项目和校准方法..... 4

 5.1 校准项目..... 4

 5.2 校准方法..... 4

6 校准结果表达..... 13

7 复校时间间隔..... 14

附录 A 校准原始记录..... 15

引 言

JJF 1001-2011《通用计量术语及定义》、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制定工作的基础性文件。

本规范是对 JJF 1460-2014《噪声系数分析仪校准规范》的修订。与 JJF 1460-2014 相比，主要变化内容包括：

- 被校噪声系数分析仪的频率范围由 10MHz~40GHz 扩展至 10MHz~67GHz；
- 噪声系数和增益的频率由单频点 1GHz 改为全带宽 10MHz~67GHz；
- 增益的测量范围由-20dB~40dB 扩展至-20dB~60dB；
- 增加完善了部分校准用设备；
- 完善了部分条款，修改了部分文字描述。

本规范历次发布情况为：

- JJG 839-1993
- JJF 1460-2014

噪声系数分析仪校准规范

1 范围

本规范适用于频率范围 10MHz~67GHz 噪声系数分析仪的校准。

2 概述

噪声系数分析仪是一种采用 Y 系数法的噪声功率接收机装置，用于测量元器件、部件和系统的噪声系数和增益。

噪声系数分析仪根据功能集成度可以分为专用噪声系数分析仪、模块化仪器和带噪声系数测量功能的矢量网络分析仪。

专用噪声系数分析仪专注于噪声系数和增益测量，由精密噪声接收机、处理单元和控制软件组成，应用于生产线测试、噪声校准装置等；模块化仪器的噪声系数测量功能作为模块卡集成在测试系统中，可应用于大规模生产测试、多端口器件测试系统集成；带噪声系数测量功能的矢量网络分析仪是将矢量网络分析仪功能与噪声系数测量功能深度集成于同一平台，可应用于研发以及元器件的全面表征（如增益、匹配、隔离度、噪声等）。

本规范主要适用于专用噪声系数分析仪和模块化仪器。

3 计量特性

3.1 频率

范围：10MHz~67GHz

调谐频率最大允许误差：±100kHz

3.2 噪声系数

范围：(0~+30) dB

最大允许误差：±0.15dB

3.3 增益

范围：(-20~+60) dB

最大允许误差：±(0.10~0.17)dB

3.4 本机噪声系数

范围：<13dB

3.5 Y 系数抖动

Y 系数抖动: $<0.17\text{dB}$ (平均系数为 1 时)

$<0.02\text{dB}$ (平均系数为 64 时)

3.6 噪声源驱动电压

噪声源供电开: $28\text{V}\pm 0.1\text{V}$

噪声源供电关: $<1\text{V}$

3.7 输入端口反射系数模值

范围: $0\sim 0.4$

注: 以上指标不是用于合格性判别, 仅供参考。

4 校准条件

4.1 校准环境条件

- a) 环境温度: $23^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$;
- b) 相对湿度: $\leq 80\%$;
- c) 供电电源: 电压 $(220\pm 11)\text{V}$, 频率 $(50\pm 1)\text{Hz}$;
- d) 其它: 周围无影响校准正常工作的机械振动和电磁干扰。

4.2 校准用设备

校准所用设备必须经过法定计量技术机构检定或校准, 符合使用要求, 并在有效期内。

校准用主要设备如下:

4.2.1 噪声源

频率范围: $10\text{MHz}\sim 67\text{GHz}$;

超噪比范围: $(4\sim 20)\text{dB}$ 。

4.2.2 微波信号源

频率范围: $10\text{MHz}\sim 67\text{GHz}$;

相对频率偏差: $\pm(1\times 10^{-8}\sim 1\times 10^{-7})$;

输出功率范围: $(-70\sim +5)\text{dBm}$ 。

4.2.3 步进衰减器

频率范围: $10\text{MHz}\sim 67\text{GHz}$;

衰减量: $(0\sim 60)\text{dB}$;

衰减步进: $0.1\text{dB}/1\text{dB}/10\text{dB}$;

衰减不确定度：0.01dB~0.12dB， $k=2$ 。

4.2.4 直流电压表

直流电压测量范围：(0~30) V；

最大允许误差： $\pm 0.03\text{V}$ 。

4.2.5 网络分析仪

频率范围：10MHz~67GHz；

反射系数模值不确定度：0.02~0.05， $k=2$ 。

4.2.6 放大器

频率范围：10MHz~67GHz；

噪声系数：< 10dB；

增益：(10~60) dB。

4.2.7 隔离器

频率：10MHz~67GHz；

隔离度：>20dB；

电压驻波比：<1.2。

4.2.8 功率计及功率敏感器

频率范围：10MHz~67GHz；

功率测量范围：(-25~+5) dBm；

校准因子不确定度：1%~4%，($k=2$)；

线性度：<0.5%。

4.2.9 定向耦合器

频率范围：10MHz~67GHz；

耦合度：>10dB；

隔离度：>30dB。

4.2.10 衰减器

频率范围：10MHz~67GHz；

衰减量：(10~40) dB；

衰减量最大允许误差： $\pm 0.2\text{dB}$

4.2.11 噪声系数分析仪

频率范围：10MHz~67GHz；

噪声系数测量不确定度： $<0.15\text{dB}$ ，($k=2$)。

5 校准项目和校准方法

5.1 校准项目

表 1 校准项目

序号	校准项目名称
1	外观及工作正常性检查
2	频率准确度
3	噪声系数
4	增益
5	本机噪声系数
6	噪声系数抖动
7	噪声源驱动电压
8	输入端口反射系数模值

5.2 校准方法

5.2.1 外观及工作正常性检查

用目测法检查被校噪声系数分析仪的外观及附件，被校噪声系数分析仪的各开关、按键等调节正常，不应有影响电气性能的机械损伤。

被校噪声系数分析仪通电后应正常工作；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。

5.2.2 频率准确度

5.2.2.1 信号源扫频法

a) 被校噪声系数分析仪测量结果显示方式为相对噪声线性功率（如果不具有相应功能，需要人工计算）、根据校准需求设置平均次数、带宽 BW （例如：设置平均次数为 16、带宽 BW 为 4MHz ），点频工作模式；



图 1 频率准确度校准框图

b) 微波信号源信号输出形式为连续波、输出功率 P_o 为 -70dBm （不同被校设备，功率设置不同）；

c) 按图 1 连接仪器设备；

d) 被校噪声系数分析仪的输出频率 f_o 按照附录 A 表 A1 设置，按照仪器说明书要求调节中频衰减量和射频衰减量，调节完毕后将其中固定；

e) 按式 (1) 改变微波信号源输出频率 $f_{o,i}$ ，记录被校噪声系数分析仪的相对噪声功率示值 $P_{x,i}$ ；

$$f_{o,i} = (f_o - BW) + i \cdot BW / 100 \quad (1)$$

式中： f_o ——微波信号源扫频的中心频率，Hz；

$f_{o,i}$ ——微波信号源的扫频频率，Hz；

i ——微波信号源扫频索引， i 取 0, 1, 2, ..., 200；

BW ——被校噪声系数分析仪的带宽，Hz。

f) 按式 (2) 计算被校噪声系数分析仪 201 个相对噪声功率代数和 P_{sum} ；

$$P_{sum} = \sum_{i=0}^{200} P_{x,i} \quad (2)$$

式中： P_{sum} ——相对噪声线性功率代数和；

$P_{x,i}$ ——第 i 个相对噪声线性功率。

g) 按公式 (3) 计算，找出使 ΔP 最小的 k 值；

$$\Delta P = \left| \sum_{i=0}^k P_{x,i} - \frac{P_{sum}}{2} \right| \quad (3)$$

式中： k ——使 ΔP 最小的相对噪声线性功率的索引， k 的取值范围为 0~200。

h) 将被校噪声系数分析仪的中心频率 $f_x = f_{o,k}$ 记录于附录 A 表 A1 中；

i) 解除中频衰减量和射频衰减量的固定设置；

j) 按附录 A 表 A1 改变测量频率,重复步骤 d)~i)。

5.2.2.2 噪声系数分析仪扫频法

a) 按图 1 连接仪器设备；

b) 被校噪声系数分析仪测量结果显示方式为相对噪声线性功率（如果不具有相应功能,需要人工计算）、平均次数不小于 16、带宽 BW 为 4MHz、频率调节步长为 $BW/100$ (MHz)；

c) 微波信号源信号输出形式为连续波、输出频率 f_o 设置按照附录 A 表 A1 设置、输出功率 P_o 为 -70dBm（不同被校设备，功率设置不同）；

d) 设置被校噪声系数分析仪的中心频率为 f_o ，按照仪器说明书要求调节中频衰减量和射频衰减量，调节完毕后将其固定；

e) 按公式 (4) 改变被校噪声系数分析仪的测试频率 $f_{x,i}$ ，记录被校噪声系数分析仪的相对噪声功率示值 $P_{x,i}$ (dB)；

$$f_{x,i} = (f_o - BW) + i \cdot BW / 100 \quad (4)$$

式中： f_o ——微波信号源的输出频率，Hz；

$f_{x,i}$ ——被校噪声系数分析仪的测试频率，Hz；

i ——被校噪声系数分析仪扫频索引， i 取 0, 1, 2, ..., 200；

BW ——被校噪声系数分析仪的带宽，Hz。

f) 按公式 (2) 计算被校噪声系数分析仪 201 个相对噪声功率代数和 P_{sum} ；

g) 按公式 (3) 计算，找出使 ΔP 最小的 k 值；

h) 按公式 (5) 计算并记录被校噪声系数分析仪中心频率的测量值 f_x 于附录 A 表 A1 中；

$$f_x = (f_o - BW) + (200 - k) \cdot BW / 100 \quad (5)$$

i) 按被校仪器说明书的要求解除中频衰减量和射频衰减量的固定设置；

j) 按附录 A 表 A1 改变测量频率,重复步骤 d)~j)。

5.2.2.3 信号源 3dB 法

a) 按图 1 连接仪器设备；

b) 微波信号源信号输出形式为连续波、输出频率 f_o 按照附录 A 表 A1 设置，输出功率 P_o 为 -70dBm；

c) 被校噪声系数分析仪测量结果显示方式为相对噪声功率(dB)、平均次数不小于 16、中心频率为 f_o ，按照仪器说明书要求调节中频衰减量和射频衰减量，调节完毕后将其固定；

d) 微调微波信号源输出频率 f_o ，使被校噪声系数分析仪相对噪声功率 (dB) 指示值达到峰值 P_{max} ，记录微波信号源此时的输出频率 f_o' ；

e) 以微波信号源输出频率 f_o' 为中心，分别向上、向下调节频率直至被校噪声系数分析仪相对噪声功率(dB)指示值由峰值 P_{max} 下降约 3dB，记录微波信号源此时的输出频率 f_H 和 f_L ；

f) 按公式 (6) 计算噪声系数分析仪中心频率测量值 f_x ，并记录于附录 A 表 A1 中；

$$f_x = (f_L + f_H) / 2 \quad (6)$$

g) 按被校仪器说明书的要求解除中频衰减量和射频衰减量的固定设置；

h) 按附录 A 表 A1 改变微波信号源频率 f_o ，重复步骤 c)~h)。

备注：信号源 3dB 法只适用于滤波器波形为单峰形的噪声系数分析仪。

5.2.3 噪声系数

5.2.3.1 步进衰减器法

a) 按图 2 连接仪器设备；

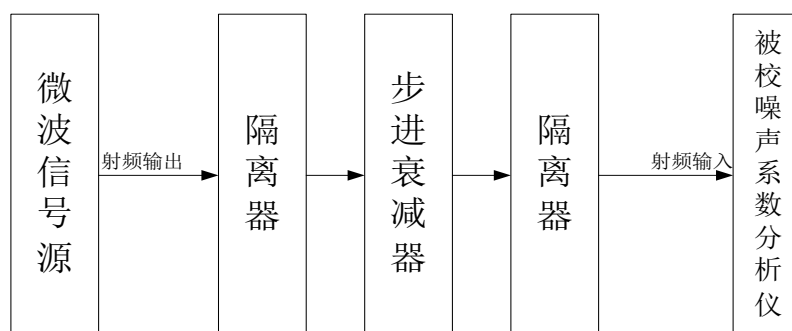


图 2 步进衰减器法噪声系数校准框图

b) 微波信号源信号输出形式为连续波、频率按照附录 A 表 A2 设置、输出功率 P_o 为 -54dBm；

c) 设置步进衰减器的衰减量为 0dB；

d) 被校噪声系数分析仪测量结果显示方式为相对噪声功率(dB)、平均次数不小于 16、设置被校噪声系数分析仪的频率与微波信号源一致,按照仪器说明书要求调节中频衰减量和射频衰减量，调节完毕后将其固定；

e) 微调信号源的频率，使被校噪声系数分析仪的读数最大；

f) 按照附录 A 表 A2 设置步进衰减器的衰减量，记录相应的被校噪声系数分析仪的噪声功率测量值 $P_{x,i}$ 于附录 A 表 A2 中；

g) 按公式 (7) 计算被校噪声系数分析仪噪声系数测量值 $NF_{x,i}$ ，并记录于附录 A 表 A2 中；

$$NF_{x,i} = ENR - 10 \lg \left(10^{\frac{P_{x,0} - P_{x,i}}{10}} - 1 \right) \quad (7)$$

式中： $NF_{x,i}$ ——被校噪声系数分析仪的噪声系数测量值, dB；

ENR ——噪声源超噪比人为设定值, 取 15dB;

$P_{x,0}$ ——衰减器为 0dB 时, 被校噪声系数分析仪噪声功率测量值, dB;

$P_{x,i}$ ——被校噪声系数分析仪噪声功率测量值, dB;

i ——索引, i 取 1~16;

注: 对于被校噪声系数分析仪噪声系数大于 20dB 的情形, 需要使用步进为 0.1dB 的衰减器, 或根据内插法计算需要的衰减量值。

h) 按公式 (8) 计算噪声系数标准值 $NF_{s,i}$, 并记录于附录 A 表 A2 中:

$$NF_{s,i} = ENR - 10 \lg \left(\frac{A_i}{10^{10}} - 1 \right) \quad (8)$$

式中: A_i ——衰减器衰减量值, dB。

5.2.3.2 功率计法

a) 按图 3 连接设备, 根据定向耦合器的耦合度选择相应的衰减器, 使得被校噪声系数分析仪射频输入端的功率约为 -54dBm;

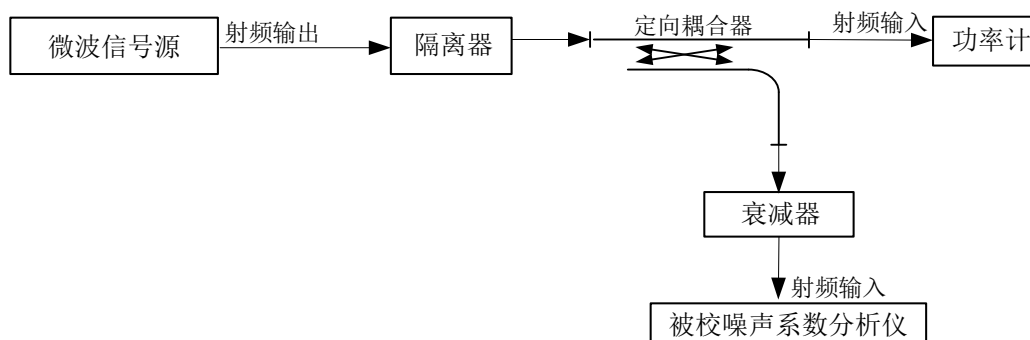


图 3 功率计法噪声系数校准框图

b) 微波信号源信号输出形式为连续波、频率按照附录 A 表 A3 设置、输出功率 P_o 为 5dBm;

c) 被校噪声系数分析仪测量结果显示方式为相对噪声功率(dB)、平均次数不小于 16、频率与微波信号源输出频率一致, 按照仪器说明书要求调节中频衰减量和射频衰减量, 调节完毕后将其中固定;

d) 微调微波信号源的输出频率, 使被校噪声系数分析仪的相对功率示值为最大值, 分别记录功率计示值 $P_{s,0}$ 和被校噪声系数分析仪相对功率示值 $P_{x,0}$ 于附录 A 表 A3 中;

e) 按照附录 A 表 A3 中要求, 设置微波信号源的输出功率;

f) 记录功率计测量值 $P_{s,i}$ 、被校噪声系数分析仪的相对噪声功率测量示值 $P_{x,i}$ 于附录 A

表 A3 中；

g) 按式 (9) 计算被校噪声系数分析仪噪声系数测量值 $NF_{x,i}$ ；

$$NF_{x,i} = ENR - 10 \lg \left(10^{\frac{P_{x,0} - P_{x,i}}{10}} - 1 \right) \quad (9)$$

式中： ENR ——噪声源超噪比人为设定值，取 15dB；

$P_{x,0}$ ——微波信号源输出功率为 5dBm 时的被校噪声系数分析仪的相对噪声功率测量示值，dBm；

$P_{x,i}$ ——微波信号源在不同输出功率下的被校噪声系数分析仪的相对噪声功率测量示值，dBm；

i ——索引， i 取 1~16

h) ，按式 (10) 计算噪声系数标准值 $NF_{s,i}$ ，并记录于附录 A 表 A3 中。

$$NF_{s,i} = ENR - 10 \lg \left(10^{\frac{P_{s,0} - P_{s,i}}{10}} - 1 \right) \quad (10)$$

式中： ENR ——噪声源超噪比人为设定值，取 15dB；

$P_{s,0}$ ——微波信号源输出功率为 5dBm 时的功率计测量值，dBm；

$P_{s,i}$ ——微波信号源在不同输出功率下的功率计测量值，dBm；

i ——索引， i 取 1~16。

注：对于被校噪声系数分析仪噪声系数大于 20dB 的情形，需要改变微波信号源输出功率的步进值。

i) 改变频点，重复步骤 c)~h)。

5.2.3.3 交替比较法

a) 按图 4 连接设备；

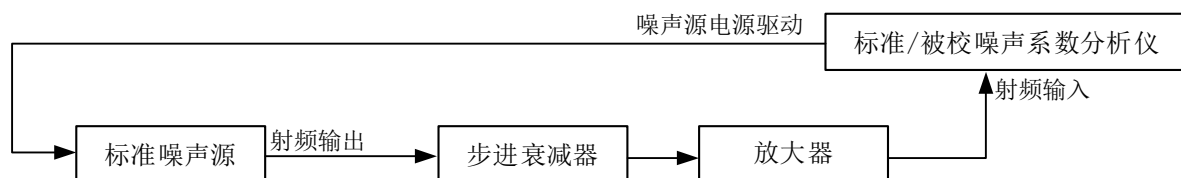


图 4. 交替比较法噪声系数校准框图

b) 将标准噪声源频率的超噪比输入到标准噪声系数分析仪中，测量频率按照附录 A 表 A4 设置、显示结果为噪声系数、单位为分贝；

c) 调节步进衰减器分别处于 0dB~30dB，记录相应的标准噪声系数分析仪噪声系数示值于附录 A 表 A4；

d) 将图 4 中的标准噪声系数分析仪替换为被校噪声系数分析仪，将标准噪声源的超噪比输入到被校噪声系数分析仪，测量频率设置为附录 A 表 A4 的频率、显示结果为噪声系数、单位为分贝；

e) 调节步进衰减器分别处于 0dB~30dB，记录相应的被校噪声系数分析仪的噪声系数示值于附录 A 表 A4；

f) 改变频点，重复步骤 c)~e)。

5.2.4 增益

a) 按图 5 连接设备，根据放大器技术指标选配相应频段的滤波器；

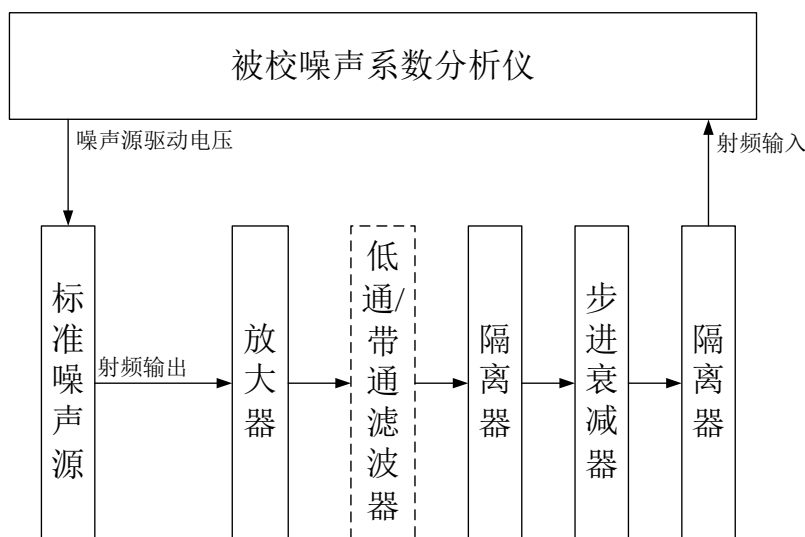


图 5 增益校准框图

b) 根据附录 A 表 A5 设置被校噪声系数分析仪的频率、平均次数不少于 16、测量方式为噪声系数修正模式；

c) 将标准噪声源超噪比值输入到被校噪声系数分析仪；

d) 对于 0dB~60dB 增益范围，设置步进衰减器为 60dB；

e) 对噪声系数分析仪进行系统校准；

f) 按照式 (11) 计算增益标准值，记录于附录 A 表 A5 中：

$$G_i = A_0 - A_i \quad (11)$$

式中： G_i ——增益标准值, dB；

A_0 ——步进衰减器在 60dB 标称值时的衰减值, dB;

A_i ——步进衰减器分别在 0dB、10dB、20dB、30dB、40dB 和 50dB 标称值时的衰减值 (i 取 0~6), dB;

g) 按照附录 A 表 A5 要求, 依次改变步进衰减器衰减量, 并记录相应的被校噪声系数分析仪的增益测量值于附录 A 表 A5;

h) 对于-20dB~0dB 增益范围, 设置步进衰减器为 0dB;

i) 对噪声系数分析仪进行系统校准;

j) 按照式 (12) 计算增益标准值, 记录于附录 A 表 A6 中:

$$G_i = A_0 - A_i \quad (12)$$

式中: G_i ——增益标准值, dB;

A_0 ——步进衰减器在 0dB 标称值时的衰减值, dB;

A_i ——步进衰减器分别在 10dB 和 20dB 标称值时的衰减值 (i 取 0~1), dB;

k) 按照附录 A 表 A6 要求, 依次改变步进衰减器衰减量, 并记录相应的被校噪声系数分析仪的增益测量值于附录 A 表 A6。

5.2.5 本机噪声系数

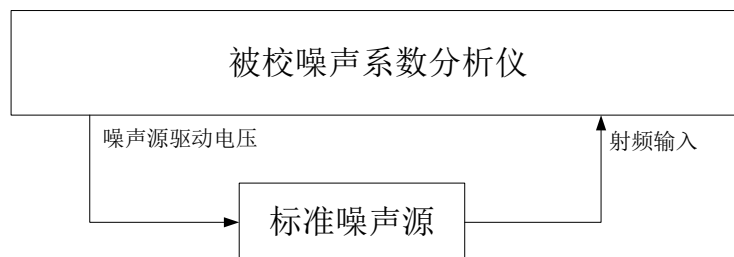


图 6 本机噪声系数校准框图

a) 按图 6 连接设备;

b) 被校噪声系数分析仪复位为出厂模式、测量结果显示方式为噪声系数 (dB)、平均次数不少于 16、将所用标准噪声源超噪比值输入到被校噪声系数分析仪内,按照附录 A 表 A7 设置测试频率;

c) 记录被校噪声系数分析仪的噪声系数测量值于附录 A 表 A7;

5.2.6 Y 系数抖动

a) 按图 6 连接设备;

b) 被校噪声系数分析仪测量结果显示方式为 Y 系数，单位为“线性”、平均次数为 1、单次测量模式、测试频率 1GHz；

c) 将噪声源超噪比值输入到被校噪声系数分析仪内；

d) 触发测量，记录被校噪声系数分析仪示值 Y_i ($i = 1 \sim 100$)；

e) 按式 (13) 计算被校噪声系数分析仪的 Y 系数抖动测量值 (线性) 并记录于附录 A 表 A8；

f) 按式 (14) 计算被校噪声系数分析仪的 Y 系数抖动测量值 (对数) 并记录于附录 A 表 A8；

$$\delta_{LIN} = \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^n Y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n Y_i \right)^2}{n(n-1)}} \quad (13)$$

$$\delta_{dB} = 10 \lg(1 + \delta_{LIN}) \quad (14)$$

式中： Y_i ——被校噪声系数分析仪的 Y 系数示值；

n ——测量次数， n 取 100；

δ_{LIN} ——Y 系数抖动，线性值；

δ_{dB} ——Y 系数抖动，dB。

g) 改变平均系数为 64，重复 d)~f) 步骤得到平均次数为 64 时的 Y 系数抖动。

5.2.7 噪声源驱动电压

a) 按图 7 连接设备；



图 7 噪声源驱动电压校准框图

b) 设置数字电压表为直流电压测量功能；

c) 分别设置被校噪声系数分析仪的噪声源驱动电压输出为开、关状态，记录相应的数字电压表示值于附录 A 表 A9 中。

5.2.8 输入端口电压反射系数模值

- a) 网络分析仪测量参数为反射系数、输出功率小于-30dBm;
- b) 按被测噪声系数分析仪频率范围设置网络分析仪的测试频率并校准网络分析仪;
- c) 按图 8 连接设备;

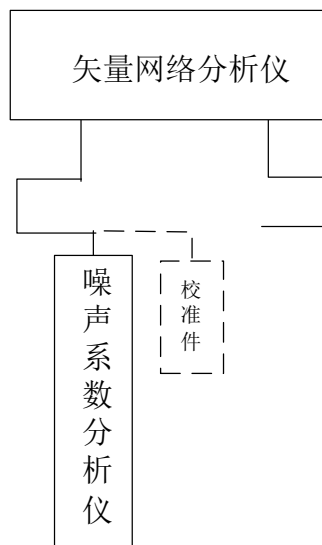


图 8 电压反射系数校准框图

- d) 根据被校噪声系数分析仪的输入端口反射系数技术指标正确的设置被校噪声系数分析仪的起始和终止频率，并将被校噪声系数分析仪的射频衰减量设为 0dB;
- e) 记录其相应频率点的反射系数模值测量值于附录 A 表 A10 中。

6 校准结果表达

噪声系数分析仪校准后，出具校准证书，校准证书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。

7 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 A1 频率准确度

中心频率示值 f_0 (GHz)	中心频率测量值 f_x (GHz)	误差 (MHz)	不确定度 (MHz)
0.010			
0.014			
0.1			
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
28			
30			
32			
34			
36			
38			
40			
42			
44			
46			
48			
50			
52			
54			

中心频率示值 f_0 (GHz)	中心频率测量值 f_x (GHz)	误差 (MHz)	不确定度 (MHz)
56			
58			
60			
62			
64			
66			
67			

表 A2 噪声系数（步进衰减器法）

频率	序号 i	衰减器 标称值 (dB)	衰减器 校准值 (dB)	噪声系数 标准值 $NF_{s,i}$ (dB)	噪声系数分析仪			
					噪声功率测 量值 $P_{x,i}$ (dB)	噪声系数测 量值 $NF_{x,i}$ (dB)	误差 (dB)	不确定 度 (dB)
10MHz	0	0		——		——	——	——
	1	1						
	2	2						
	3	3						
	4	4						
	5	5						
	6	6						
	7	7						
	8	8						
	9	9						
	10	10						
	11	11						
	12	12						
	13	13						
	14	14						
	15	15						
...	0	0		——		——	——	——
	1	1						
	2	2						
	3	3						
	4	4						
	5	5						
	6	6						
	7	7						
	8	8						
	9	9						
	10	10						
	11	11						
	12	12						
	13	13						
	14	14						
	15	15						

频率	序号 i	衰减器 标称值 (dB)	衰减器 校准值 (dB)	噪声系数 标准值 $NF_{s,i}$ (dB)	噪声系数分析仪			
					噪声功率测 量值 $P_{x,i}$ (dB)	噪声系数测 量值 $NF_{x,i}$ (dB)	误差 (dB)	不确定 度 (dB)
67GHz	0	0						
	1	1						
	2	2						
	3	3						
	4	4						
	5	5						
	6	6						
	7	7						
	8	8						
	9	9						
	10	10						
	11	11						
	12	12						
	13	13						
	14	14						
	15	15						

表 A3 噪声系数（功率计法）

频率	微波信号源 输出功率 P_o (dBm)	功率计 测量值 $P_{s,i}$ (dBm)	噪声系数分 析仪 噪声功率 测量值 $P_{x,i}$ (dB)	噪声系数 标准值 $NF_{s,i}$ (dB)	噪声系数 测量值 $NF_{x,i}$ (dB)	误差 (dB)	不确定 度 (dB)
10MHz	5			——	——	——	——
	4						
	3						
	2						
	1						
	0						
	-1						
	-2						
	-3						
	-4						
	-5						
	-6						
	-7						
	-8						
	-9						
	-10						
...	5			——	——	——	——
	4						
	3						

频率	微波信号源 输出功率 P_o (dBm)	功率计 测量值 $P_{s,i}$ (dBm)	噪声系数分 析仪 噪声功率 测量值 $P_{x,i}$ (dB)	噪声系数 标准值 $NF_{s,i}$ (dB)	噪声系数 测量值 $NF_{x,i}$ (dB)	误差 (dB)	不确定 度 (dB)
	2						
	1						
	0						
	-1						
	-2						
	-3						
	-4						
	-5						
	-6						
	-7						
	-8						
	-9						
	-10						
67GHz	5			——	——	——	——
	4						
	3						
	2						
	1						
	0						
	-1						
	-2						
	-3						
	-4						
	-5						
	-6						
	-7						
	-8						
	-9						
	-10						

表 A4 噪声系数（交替比较法）

频率	衰减器标称值 (dB)	噪声系数标准值 (dB)	噪声系数测量值 (dB)	误差 (dB)	不确定 度 (dB)
10MHz	0				
	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
	6				
	7				
	8				
	9				

频率	衰减器标称值 (dB)	噪声系数标准值 (dB)	噪声系数测量值 (dB)	误差 (dB)	不确定度 (dB)
	10				
	11				
	15				
	20				
	25				
	30				
...	0				
	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
	6				
	7				
	8				
	9				
	10				
	11				
	15				
	20				
	25				
	30				
67GHz	0				
	1				
	2				
	3				
	4				
	5				
	6				
	7				
	8				
	9				
	10				
	15				
	20				
	25				
	30				

表 A5 增益 (0dB~60dB)

频率	衰减器标称值 (dB)	增益标准值 (dB)	增益测量值 (dB)	误差 (dB)	不确定度 (dB)
	60				
	50				
	40				
	30				
	20				

频率	衰减器标称值 (dB)	增益标准值 (dB)	增益测量值 (dB)	误差 (dB)	不确定度 (dB)
	10				
	0				

表 A6 增益 (-20dB~0dB)

频率	衰减器标称值 (dB)	增益标准值 (dB)	增益测量值 (dB)	误差 (dB)	不确定度 (dB)
	0				
	10				
	20				

表 A7 本机噪声系数

频率(GHz)	本机噪声系数测量值(dB)	不确定度 (dB)
0.01		
0.1		
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
.....		
67		

表 A8 Y 系数抖动

平均系数	Y 系数抖动	不确定度
1		
64		

表 A9 噪声源驱动电压输出

开关状态	电压测量值 (V)	不确定度 (V)
开		
关		

表 A10 输入端口电压反射系数模值

频率(GHz)	反射系数模值	不确定度
0.01		
0.1		
1		

频率(GHz)	反射系数模值	不确定度
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
.....		
67		

附录 B 校准证书内页格式

表 B1 频率准确度

中心频率示值 f_0 (GHz)	中心频率测量值 f_x (GHz)	误差 (MHz)	不确定度 (MHz)

表 B2 噪声系数

频率 (GHz)	噪声系数标准值 (dB)	噪声系数测量值 (dB)	误差 (dB)	不确定度 (dB)

表 B3 增益

频率 (GHz)	增益标准值 (dB)	增益测量值 (dB)	误差 (dB)	不确定度 (dB)

表 B4 本机噪声系数

频率(GHz)	本机噪声系数测量值(dB)	不确定度 (dB)

表 B5 Y 系数抖动

平均系数	Y 系数抖动	不确定度
1		
64		

表 B6 噪声源驱动电压输出

开关状态	电压测量值 (V)	不确定度 (V)
开		
关		

表 B7 输入端口反射系数模值

频率(GHz)	反射系数模值	不确定度

附录 C 主要项目测量不确定度评定示例

C1 频率准确度校准不确定度评定（信号源扫频法）

C1.1 数学模型

$$\begin{aligned}
 f_x &= (f_0 - BW) + k \cdot BW / 100 \left| \min \left| \sum_{i=0}^k P_{x,i} - \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{200} P_{x,i} \right| \right| \\
 &= f_{0,0} + k \cdot (f_{0,200} - f_{0,0}) / 200 \left| \min \left| \frac{1}{2} \sum_{i=0}^k P_{x,i} - \frac{1}{2} \sum_{i=k+1}^{200} P_{x,i} \right| \right|
 \end{aligned} \tag{C.1}$$

式中： f_x ——被校噪声系数分析仪中心频率的测量值，Hz；

f_0 ——信号源扫频的中心频率，Hz；

$f_{0,0}$ ——信号源扫频的起始频率，Hz；

$f_{0,200}$ ——信号源扫频的终止频率，Hz；

BW ——被校噪声系数分析仪的带宽设定值，Hz；

k ——满足 $\min \left| \frac{1}{2} \sum_{i=0}^k P_{x,i} - \frac{1}{2} \sum_{i=k+1}^{200} P_{x,i} \right|$ 的扫频点的索引，从0开始，且一般 $k \approx 100$ ；

$P_{x,i}$ ——被校噪声系数分析仪在第 i 个扫频点的噪声功率测量值。

C1.2 不确定度来源

- (1) 信号源扫频的起始频率 $f_{0,0}$ 不准引入的标准不确定度分量 u_1 ；
- (2) 信号源扫频的终止频率 $f_{0,200}$ 不准引入的标准不确定度分量 u_2 ；
- (3) 满足 $\min \left| \frac{1}{2} \sum_{i=0}^k P_{x,i} - \frac{1}{2} \sum_{i=k+1}^{200} P_{x,i} \right|$ 的 k 不准引入的标准不确定度分量 u_3 ；
- (4) 测量重复性引入的不确定度分量 u_4 。

C1.3 不确定度评定（以 26GHz 为例）

- (1) $f_{0,0}$ 不准引入的标准不确定度分量 u_1

$f_{0,0}$ 不准引入的标准不确定度分量 u_1 按 B 类评定， $f_{0,0}$ 不准是由于信号源频率不准引入

的, 信号源的频率准确度一般优于 $U_{ref} = 1 \times 10^{-7} (k=2)$, 其不确定度在 25.996GHz 时为 $U = 2.5996\text{kHz} (k=2)$, 由其引入的标准不确定度分量

$$u_1 = c_1 U / k = \frac{\partial f_x}{\partial f_{0,0}} U / k \approx 0.5 \times U / k = 0.65\text{kHz};$$

(2) $f_{0,200}$ 不准引入的标准不确定度分量 u_2

$f_{0,200}$ 不准引入的标准不确定度分量 u_2 按 B 类评定, $f_{0,200}$ 不准是由于信号源频率不准引入的, 信号源的频率准确度一般优于 $U_{ref} = 1 \times 10^{-7} (k=2)$, 其不确定度在 26.004GHz 时为 $U = 2.6004\text{kHz} (k=2)$, 由其引入的标准不确定度分量

$$u_2 = c_2 U / k = \frac{\partial f_x}{\partial f_{0,200}} U / k \approx 0.5 \times U / k = 0.65\text{kHz};$$

(3) 满足 $\min \left| \frac{1}{2} \sum_{i=0}^k P_{x,i} - \frac{1}{2} \sum_{i=k+1}^{200} P_{x,i} \right|$ 的 k 不准引入的不确定分量 u_3

k 不准引入的不确定分量 u_3 按 B 类评定。 k 不准有几个来源: k 的离散性、信号源输出功率在测试带宽内的平坦度、信号源输出功率的稳定度和噪声系数分析仪测量结果的稳定度。

由于 k 只能取整数值, 所以其误差限为 0.5, 按均匀分布取 $k = \sqrt{3}$, 则由离散性引入的 k 的标准不确定度分量为 0.29;

信号源输出功率在测试带宽内的平坦度优于 0.01dB ($k=2$), 线性相对值为 0.23% ($k=2$),

则 201 个点引入的 $\left| \frac{1}{2} \sum_{i=0}^k P_{x,i} - \frac{1}{2} \sum_{i=k+1}^{200} P_{x,i} \right|$ 的不确定度为

$$\sqrt{\sum_{i=0}^{200} \left(\frac{1}{2} \times (P_{x,i} \times 0.23\% / 2) \right)^2} \approx 0.0049 \quad (\text{式中 } P_{x,i} \text{ 取相对于最大测量值的归一化功率值})。$$

数分析仪的响应曲线在满足 $\min \left| \frac{1}{2} \sum_{i=0}^k P_{x,i} - \frac{1}{2} \sum_{i=k+1}^{200} P_{x,i} \right|$ 的 k 处的归一化斜率测量值

(<0.01) 可知其引入的 k 的标准不确定度分量为 $0.0049 / 0.01 = 0.49$;

信号源的输出功率的稳定度和噪声系数分析仪测量结果的稳定度作为测量重复性的分量统一考虑。

所以 k 不准引入的不确定分量

$$u_3 = c_3 u(k) = \frac{\partial f_x}{\partial k} u(k) = \frac{f_{0,200} - f_{0,0}}{200} u(k) = 40 \times \sqrt{0.29^2 + 0.49^2} \approx 23 \text{ kHz}$$

(4) 测量重复性引入的标准不确定度分量 u_4

由测量重复性引入的标准不确定度分量 u_4 按 A 类评定, 在 26GHz 频率点上, 重复测量测量噪声系数分析仪的中心频率 10 次。测量数据如下:

次数	频率测量值 x_i (GHz)
1	25.99996
2	25.99992
3	25.99992
4	25.99988
5	26.00000
6	25.99992
7	25.99992
8	25.99996
9	25.99992
10	26.00000
平均值 \bar{x}	25.99994

由下式计算得到测量重复性引入的标准不确定度分量为

$$u_4 = \frac{s_n(x)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} = 12 \text{ kHz}$$

C1.4 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	引入的标准不确定度分量 (kHz)
u_1	信号源扫频的起始频率 $f_{0,0}$ 不准	B 类	正态	2	0.65
u_2	信号源扫频的终止频率 $f_{0,200}$ 不准	B 类	正态	2	0.65
u_3	满足 $\min \left \frac{1}{2} \sum_{i=0}^k P_{x,i} - \frac{1}{2} \sum_{i=k+1}^{200} P_{x,i} \right $ 条件的 k 不准	B 类	/	/	23
u_4	测量重复性	A 类	/	/	12

C1.5 合成标准不确定度；

已知各不确定度分量不相关，则合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} \approx 26\text{kHz}$$

C1.6 扩展不确定度；

取 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U = k \cdot u_c = 52\text{kHz}$$

C2 频率准确度校准不确定度评定（噪声系数分析仪扫频法）

C2.1 数学模型

$$\begin{aligned} f_x &= (f_o - BW) + (200 - k) \cdot BW / 100 \left| \min \left| \sum_{i=0}^k P_{x,i} - \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{200} P_{x,i} \right| \right. \\ &= f_{x,0} + (200 - k) \cdot (f_{x,200} - f_{x,0}) / 200 \left| \min \left| \frac{1}{2} \sum_{i=0}^k P_{x,i} - \frac{1}{2} \sum_{i=k+1}^{200} P_{x,i} \right| \right. \end{aligned} \quad (\text{C.2})$$

式中： f_x ——被校噪声系数分析仪中心频率的测量值，Hz；

f_o ——信号源的设定频率，Hz；

$f_{x,0}$ ——被校噪声系数分析仪扫频的起始频率，Hz；

$f_{x,200}$ ——被校噪声系数分析仪扫频的终止频率，Hz；

BW ——被校噪声系数分析仪的测量带宽，Hz；

k ——满足 $\min \left| \frac{1}{2} \sum_{i=0}^k P_{x,i} - \frac{1}{2} \sum_{i=k+1}^{200} P_{x,i} \right|$ 的扫频点的索引，从0开始，且一般 $k \approx 100$ ；

$P_{x,i}$ ——被校噪声系数分析仪在第 i 个扫频点的噪声功率测量值。

C2.2 不确定度来源

(1) 扫频的起始频率 $f_{x,0}$ 不准引入的标准不确定度分量 u_1 ；

(2) 扫频的终止频率 $f_{x,200}$ 不准引入的标准不确定度分量 u_2 ;

(3) 满足 $\min \left| \frac{1}{2} \sum_{i=0}^k P_{x,i} - \frac{1}{2} \sum_{i=k+1}^{200} P_{x,i} \right|$ 的 k 不准引入的标准不确定度分量 u_3 ;

(4) 测量重复性引入的不确定度分量 u_4 。

C2.3 不确定度评定

(1) 扫频的起始频率 $f_{x,0}$ 不准引入的标准不确定度分量 u_1 ;

扫频的起始频率 $f_{x,0}$ 不准引入的标准不确定度分量 u_1 按 B 类评定, 扫频的起始频率不准有两部分组成, 一部分是噪声系数分析仪的频率不准, 由噪声系数分析仪的说明书可知, 其最大允许误差为 $\pm 400\text{kHz}$, 则区间的半宽度 $\Delta = 400\text{kHz}$, 按均匀分布取 $k_1 = \sqrt{3}$; 另一部分是信号源的频率不准, 信号源的频率准确度一般优于 $U_{2rel} = 1 \times 10^{-7}$ ($k_2 = 2$), 其不确定度分量在 26GHz 时, $U_2 = 1 \times 10^{-7} \times 26\text{GHz} = 2.6\text{kHz}$ ($k_2 = 2$), 因此扫频的起始频率 $f_{x,0}$ 的标准

不确定度 $u_{c1} = \sqrt{\left(\frac{\Delta}{k_1}\right)^2 + \left(\frac{U_2}{k_2}\right)^2} = 231\text{kHz}$, 由 $f_{x,0}$ 不准引入的标准不确定度分量。

$$u_1 = c_1 u_{c1} = \frac{\partial f_x}{\partial f_{x,0}} u_{c1} \approx 0.5 \times 231 = 115\text{kHz}$$

(2) 扫频的终止频率 $f_{x,200}$ 不准引入的标准不确定度分量 u_2

扫频的终止频率 $f_{x,200}$ 不准引入的标准不确定度分量 u_2 按 B 类评定, 扫频的终止频率不准有两部分组成, 一部分是噪声系数分析仪的频率不准, 由噪声系数分析仪的说明书可知, 其最大允许误差为 $\pm 400\text{kHz}$, 则区间的半宽度 $\Delta = 400\text{kHz}$, 按均匀分布取 $k_1 = \sqrt{3}$; 另一部分是信号源的频率不准, 信号源的频率准确度一般优于 $U_{2rel} = 1 \times 10^{-7}$ ($k_2 = 2$), 其不确定度分量在 26GHz 时, $U_2 = 1 \times 10^{-7} \times 26\text{GHz} = 2.6\text{kHz}$ ($k_2 = 2$), 因此扫频的起始频率 $f_{x,200}$ 的标

准不确定度 $u_{c2} = \sqrt{\left(\frac{\Delta}{k_1}\right)^2 + \left(\frac{U_2}{k_2}\right)^2} = 231\text{kHz}$, 由 $f_{x,200}$ 不准引入的标准不确定度分量。

$$u_2 = c_2 u_{c2} = \frac{\partial f_x}{\partial f_{x,200}} u_{c2} \approx 0.5 \times 231 = 115\text{kHz}$$

(3) 满足 $\min \left| \frac{1}{2} \sum_{i=0}^k P_{x,i} - \frac{1}{2} \sum_{i=k+1}^{200} P_{x,i} \right|$ 条件的 k 不准引入的不确定分量 u_3

k 不准引入的不确定分量 u_3 按 B 类评定。 k 不准有几个来源: k 的离散性、噪声系数分

析仪噪声功率测量值在测试带宽内的平坦度、信号源输出功率的稳定度和噪声系数分析仪测量结果的稳定度。

由于 k 只能取整数值, 所以其误差限为 0.5, 按均匀分布取 $k = \sqrt{3}$, 则由离散性引入的 k 的标准不确定度分量为 0.29;

噪声系数分析仪噪声功率测量值在测试带宽内的平坦度优于 0.03dB ($k=2$), 线性相对值为 0.69% ($k=2$), 则 201 个点引入的 $\left| \frac{1}{2} \sum_{i=0}^k P_{x,i} - \frac{1}{2} \sum_{i=k+1}^{200} P_{x,i} \right|$ 的不确定度为

$$\left| \frac{1}{2} \sum_{i=0}^k P_{x,i} - \frac{1}{2} \sum_{i=k+1}^{200} P_{x,i} \right| \approx 0.015 \quad (\text{式中 } P_{x,i} \text{ 取相对于最大测量值的归一化功率值})。$$

由噪声系数分析仪的响应曲线在满足 $\min \left| \frac{1}{2} \sum_{i=0}^k P_{x,i} - \frac{1}{2} \sum_{i=k+1}^{200} P_{x,i} \right|$ 的 k 处的归一化斜率测量值

(<0.01) 可知其引入的 k 的标准不确定度分量为 $0.015/0.01=1.5$;

信号源输出功率的稳定度和噪声系数分析仪测量结果的稳定度作为测量重复性的分量统一考虑。

所以 k 不准引入的标准不确定分量

$$u_3 = c_3 u(k) = \frac{\partial f_x}{\partial k} u(k) = \frac{f_{x,200} - f_{x,0}}{200} u(k) = 40 \times \sqrt{0.29^2 + 1.5^2} = 61 \text{ kHz}$$

(4) 测量重复性引入的标准不确定度分量 u_3 。

在 26GHz 频率点上, 重复测量噪声系数分析仪的中心频率 10 次。测量数据如下:

次数	频率测量值 x_i (GHz)
1	25.99988
2	25.99996
3	25.99996
4	25.99992
5	25.99992
6	26.00000
7	26.00000
8	26.00000
9	25.99996
10	25.99992
平均值 \bar{x}	25.99995

由下式计算得到测量重复性引入的标准不确定度分量为

$$u_4 = \frac{s_n(x)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} = 13\text{kHz}$$

C2.4 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	引入的标准不确定度分量 (kHz)
u_1	扫频的起始频率 $f_{x,0}$ 不准	B 类	/	/	115
u_2	扫频的终止频率 $f_{x,200}$ 不准	B 类	/	/	115
u_3	满足 $\min \left \frac{1}{2} \sum_{i=0}^k P_{x,i} - \frac{1}{2} \sum_{i=k+1}^{200} P_{x,i} \right $ 条件的 k 不准	B 类	/	/	61
u_4	测量重复性	A 类	/	/	13

C2.5 合成标准不确定度：

已知各不确定度分量不相关，则合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = 174\text{kHz} = 0.17\text{MHz}$$

C2.6 扩展不确定度

取 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U = k \cdot u_c = 0.35\text{MHz}$$

C3 噪声系数校准不确定度评定（步进衰减器法）

C3.1 数学模型

采用直接测量法，其中标准噪声系数的数学模型为

$$NF_{std} = ENR - 10 \lg \left(10^{\frac{\Delta A_{tot}}{10}} - 1 \right) \quad (\text{C.3})$$

$$\Delta A_{tot} = \Delta P_o + \Delta A \quad (\text{C.4})$$

式中： ENR ——噪声源超噪比值（人为设定值），dB；

ΔA_{tot} ——总的衰减的增大量，dB；

ΔP_o ——信号源输出功率的变化量，减小为正，dB

ΔA ——衰减器的衰减增大量，dB；

C3.2 不确定度来源

（1）标准噪声系数不准引入的标准不确定度分量 u_1 ；

（2）测量重复性引入的标准不确定度分量 u_2 ；

C3.3 不确定度分量评定

（1）标准噪声系数 NF_{std} 不准引入的标准不确定度分量 u_1 ；

标准噪声系数 NF_{std} 不准引入的标准不确定度分量 u_1 按B类评定。由标准噪声系数的公式可知，标准噪声系数主要由两个量决定：第一是噪声源超噪比 ENR ，第二是总的衰减增加量 ΔA_{tot} 。其中噪声源的超噪比 ENR 是一个人为设定值，不引入测量不确定度。因此只剩下了 ΔA_{tot} ，再由 ΔA_{tot} 公式可知，其主要由两个分量组成：第一是信号源输出功率的变化量 ΔP_o ；第二是衰减器的衰减增大量 ΔA 。其中第一项 ΔP_o 主要由信号源本身的稳定性决定，这一项在测量重复性中评估。衰减器的增大量 ΔA 的不确定度可由衰减器的校准证书获得，在这里取其为 $U = 0.04\text{dB} (k = 2)$ 。因此由标准噪声系数不准引入的标准不确定度分量为：

$$u_1 = c_1 \cdot u(NF_{std}) = c_1 \cdot \left(\frac{\partial NF_{std}}{\partial \Delta A_{tot}} U / k \right) = c_1 \cdot \left(\frac{-10^{\frac{\Delta A_{tot}}{10}}}{\left(10^{\frac{\Delta A_{tot}}{10}} - 1 \right)} U / k \right) = -0.02\text{dB}$$

（2）测量重复性引入的标准不确定度分量 u_2 ；

测量重复性引入的标准不确定度分量 u_2 按A类评定，用步进衰减器法校准噪声系数分析仪噪声系数测量功能10次，其测量结果如下表所示。

次数	噪声系数测量值 x_i (dB)
1	5.48

2	5.48
3	5.48
4	5.47
5	5.47
6	5.48
7	5.47
8	5.47
9	5.47
10	5.47
平均值 \bar{x}	5.474

由下式计算得到测量重复性引入的标准不确定度分量为

$$u_2 = \frac{s_n(x)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} = 0.0016 \text{ dB}$$

C3.4 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	引入的标准不确定度分量 (dB)
u_1	标准噪声系数不准	B 类	正态	2	-0.02
u_2	测量重复性	A 类			0.0016

C3.5 合成标准不确定度:

已知各不确定度分量不相关, 则合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 0.02 \text{ dB}$$

C3.6 扩展不确定度

取 $k=2$, 则扩展不确定度为:

$$U = k \cdot u_c = 0.04 \text{ dB} (k=2)$$

C4 噪声系数校准不确定度评定 (功率计法)

C4.1 数学模型

采用直接测量法。其中标准噪声系数的数学模型为

$$NF_{std} = ENR - 10 \lg \left(10^{\frac{\Delta P}{10}} - 1 \right) \quad (C.5)$$

式中： ENR ——噪声源超噪比值（人为设定值），dB；

ΔP ——由功率计测量得到的功率变化量，dB；

C4.2 不确定度来源

（1）标准噪声系数 NF_{std} 不准引入的标准不确定度分量 u_1 ；

（2）测量重复性引入的标准不确定度分量 u_2 ；

C4.3 不确定度分量评定

（1）标准噪声系数 NF_{std} 不准引入的标准不确定度分量 u_1

标准噪声系数 NF_{std} 不准引入的标准不确定度分量 u_1 按 B 类评定，其主要由功率计的线性度决定，由功率计的说明书可知，功率计的线性度在小动态范围内为 $U = 0.02\text{dB}$ ($k = 2$)，则功率计测量得到的功率变化量 ΔP 不准引入的标准不确定度分量

$$u_1 = c_1 \cdot u(NF_{std}) = c_1 \cdot \left(\frac{\partial NF_{std}}{\partial \Delta P} U / k \right) = c_1 \cdot \left(\frac{-10^{\frac{\Delta P}{10}}}{\left(10^{\frac{\Delta P}{10}} - 1 \right)} U / k \right) = -0.01\text{dB}$$

（2）测量重复性引入的标准不确定度分量 u_2

测量重复性引入的标准不确定度分量 u_2 按A类评定，用功率计法校准噪声系数分析仪噪声系数测量功能10次，其测量结果如下表所示。

索引	噪声系数测量值 x_i (dB)
1	5.64
2	5.63
3	5.64
4	5.62
5	5.63
6	5.64
7	5.65
8	5.64

9	5.64
10	5.63
平均值 \bar{x}	5.636

由下式计算得到测量重复性引入的标准不确定度分量为

$$u_2 = \frac{s_n(x)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} = 0.003\text{dB}$$

C4.4 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	引入的标准不确定度分量 (dB)
u_1	标准噪声系数不准	B 类	正态	2	-0.01
u_2	测量重复性	A 类			0.003

C4.5 合成标准不确定度;

已知各不确定度分量不相关, 则合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 0.01\text{dB}$$

C4.6 扩展不确定度

取 $k=2$, 则扩展不确定度为:

$$U = k \cdot u_c = 0.02\text{dB}(k=2)$$

C5 增益校准不确定度评定

C5.1 数学模型

采用直接测量法, 其中标准增益的数学模型为

$$G_{std} = \Delta A + \Delta G_{amp} + \Delta ENR \quad (\text{C.6})$$

式中: G_{std} ——标准增益值, dB;

ΔA ——在测试过程中, 衰减器的衰减减小量, dB;

ΔG_{amp} ——在测试过程中, 放大器增益变化量, 增大为正, dB;

ΔENR ——在测试过程中, 噪声源超噪比变化量, 减小为正, dB;

C5.2 不确定度来源

(1) 标准增益 G_{std} 不准引入的标准不确定度分量 u_1 ;

(2) 测量重复性引入的不确定度分量 u_2 。

C5.3 不确定度评定

(1) 标准增益 G_{std} 不准引入的标准不确定度分量 u_1

标准增益 G_{std} 不准引入的标准不确定度分量 u_1 按 B 类评定。由公式 (B.7) 可知, 标准增益 G_{std} 不准有三个来源: 衰减器的衰减减小量不准、放大器增益不稳、噪声源超噪比不稳。其中放大器增益不稳和噪声源超噪比不稳不单独评定, 在测量重复性中一并评估。衰减器的衰减减小量的不确定度由衰减器的证书可知其为 $U = 0.04\text{dB} (k = 2)$, 所以由标准增益 G_{std} 不准引入的标准不确定度分量

$$u_1 = c_1 U / k = 0.04 / 2 = 0.02\text{dB}$$

(2) 测量重复性引入的标准不确定度分量 u_2

测量重复性引入的标准不确定度分量 u_2 按 A 类评定, 用噪声系数分析仪测量增益 10 次, 测量数据如下:

索引	增益测量值 x_i (dB)
1	19.77
2	19.79
3	19.79
4	19.78
5	19.79
6	19.78
7	19.79
8	19.79
9	19.79
10	19.82
平均值 \bar{x}	19.789

由下式计算得到测量重复性引入的标准不确定度分量为

$$u_2 = \frac{s_n(x)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} = 0.004\text{dB}$$

C5.4 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	引入的标准不确定度分量 (dB)
u_1	标准增益不准	B 类	正态	2	0.02
u_2	测量重复性	A 类			0.004

C5.5 合成标准不确定度

已知各不确定度分量不相关，则合成相对标准不确定度：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 0.02 \text{ dB}$$

C5.6 扩展不确定度

取 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U = k \cdot u_c = 0.04 \text{ dB} (k=2)$$

C6 本机系统噪声系数校准不确定度评定

C6.1 数学模型

$$NF = ENR - 10 \lg(Y - 1) \quad (\text{C.7})$$

式中： NF ——系统噪声系数，dB；

ENR ——噪声源超噪比，dB；

Y ——Y系数，线性值。

C6.2 不确定度来源

- (1) 噪声源超噪比不准引入的标准不确定度分量 u_1 ；
- (2) 噪声系数分析仪测量不准引入的标准不确定度分量 u_2 ；
- (3) 测量重复性引入的标准标准不确定度分量 u_3 。

C6.3 不确定度分量评定

- (1) 噪声源超噪比不准引入的标准不确定度分量 u_1

噪声源超噪比不准引入的标准不确定度分量 u_1 按 B 类评定。由噪声源的校准证书得知，超噪比的不确定度为 $U = 0.2\text{dB}$ ($k=2$)，所以

$$u_1 = c_1 U / k = \frac{\partial NF}{\partial ENR} \cdot U / k = U / k = 0.2/2 = 0.1\text{dB}$$

(2) 噪声系数分析仪测量不准引入的标准不确定度分量 u_2

噪声系数分析仪测量不准引入的标准不确定度分量 u_2 按 B 类评定。由噪声系数分析仪噪声系数测量校准部分的不确定度分析可知，公式 (C.7) 中右侧的后一部份 $-10\lg(Y-1)$ 其对噪声系数测量不确定度的贡献就是噪声系数分析仪测量不准的贡献，因此由噪声系数分析仪的说明书可知，其最大允许误差为 $\pm 0.04\text{dB}$ ，则区间的半宽度 $\Delta = 0.04\text{dB}$ ，按均匀分布取 $k = \sqrt{3}$ ，由其引入的标准不确定度分量为

$$u_2 = c_2 U / k = 1 \times 0.04 / \sqrt{3} = 0.02\text{dB}$$

(3) 测量重复性引入的标准标准不确定度分量 u_3

由测量重复性引入的标准不确定度分量 u_3 按 A 类评定，在 26.5GHz 重复测量（噪声源超噪比为 14.8dB ）利用噪声系数分析仪本身噪声系数 10 次。测量结果见下表：

索引	噪声系数 x_i (dB)
1	9.485
2	9.478
3	9.488
4	9.484
5	9.497
6	9.487
7	9.524
8	9.505
9	9.501
10	9.508
平均值 \bar{x}	9.4957

由下式计算得到测量重复性引入的标准不确定度分量为

$$u_3 = \frac{s_n(x)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} = 0.005\text{dB}$$

C6.4 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	引入的标准不确定度分量 (dB)
u_1	噪声源超噪比不准	B 类	正态	2	0.1
u_2	噪声系数分析仪测量不准	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	0.02
u_3	测量重复性	A 类			0.005

C6.5 合成标准不确定度；

已知各不确定度分量不相关，则合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 0.1\text{dB}$$

C6.6 扩展不确定度

取 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U = ku_c = 2 \times 0.1 = 0.2\text{dB}$$

C7 Y 系数测量抖动校准不确定度评定

C7.1 数学模型

$$\delta_{LIN} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}{n-1}}, \quad (n=100) \quad (\text{C.8})$$

$$\delta_{dB} = 10 \lg(1 + \delta_{LIN}) \quad (\text{C.9})$$

即： $\delta_{line} = f(Y_i, \bar{Y})$ ，其中 Y_i 与 \bar{Y} 相关。

$$\text{灵敏系数: } \begin{cases} c_{Y_i} = \frac{1}{\sqrt{n-1}} \cdot \frac{Y_i - \bar{Y}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \\ c_{\bar{Y}} = \frac{1}{\sqrt{n-1}} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \end{cases} \quad (\text{C.10})$$

式中： Y_i ——噪声系数分析仪的 Y 系数测量值，线性值；

n ——测量次数， n 取 100；

δ_{LIN} ——Y 系数测量抖动，线性值；

δ_{dB} ——Y 系数测量抖动，dB。

C7.2 不确定度来源

(1) Y_i 引入的标准不确定度分量 u_1 ；

(2) \bar{Y} 引入的标准不确定度分量 u_2 。

C7.3 不确定度分量评定

(1) Y_i 引入的标准不确定度分量 u_1

Y_i 引入的标准不确定度分量按照 B 类评定，由说明书可知，当平均次数为 1 时，最大允许误差为 0.15dB，线性值为 0.0351，当平均次数为 64 时，最大允许误差为 0.02dB，线性值为 0.0046，其值服从平均分布，取 $k = \sqrt{3}$ ，

$$u_{Y_i} = 0.0203, \text{ 平均次数为 } 1$$

$$u_{\bar{Y}} = 0.0027, \text{ 平均次数为 } 64$$

$$u_1 = \sqrt{\sum_{i=1}^n (c_{Y_i} u_{Y_i})^2}$$

(1) \bar{Y} 引入的标准不确定度分量 u_2

\bar{Y} 引入的标准不确定度分量按照 A 类评定，由 100 次重复测量数据可知， \bar{Y} 引入的标准不确定度分量为，

$$u_{\bar{Y}} = \frac{u_{Y_i}}{\sqrt{n}} = 0.00203, \text{ 平均次数为 } 1$$

$$u_{\bar{Y}} = \frac{u_{Y_i}}{\sqrt{n}} = 0.00027, \text{ 平均次数为 } 64$$

$$u_2 = c_{\bar{Y}} u_{\bar{Y}}$$

经计算, $c_{\bar{Y}} \approx 2 \times 10^{-12}$, 因此 \bar{Y} 引入的不确定度分量可以忽略不计。

C7.4 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	标准不确定分量
u_1	Y_i 不准	B 类	均匀	$\sqrt{3}$	$\sqrt{\sum_{i=1}^n (c_{Y_i} u_{Y_i})^2}$, 平均 次数为 1
					$\sqrt{\sum_{i=1}^n (c_{Y_i} u_{Y_i})^2}$, 平均 次数为 64
u_2	\bar{Y} 不准	A 类	/	/	忽略不计

C7.5 合成标准不确定度

u_1 与 u_2 相关, 但 u_2 忽略不计, 则合成标准不确定度为:

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n (c_{Y_i} u_{Y_i})^2} = 0.00203, \text{ 平均次数为 } 1$$

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n (c_{Y_i} u_{Y_i})^2} = 0.00027, \text{ 平均次数为 } 64$$

$$\text{即: } u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n (c_{Y_i} u_{Y_i})^2} = 0.008\text{dB}, \text{ 平均次数为 } 1$$

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^n (c_{Y_i} u_{Y_i})^2} = 0.001\text{dB}, \text{ 平均次数为 } 64$$

C7.6 扩展不确定度

取 $k=2$, 则扩展不确定度为:

$$U = 2u_c = 0.0041, \text{ 平均次数为 } 1$$

$$U = 2u_c = 0.00053, \text{ 平均次数为 } 64$$

$$\text{即: } U = 2u_c = 0.017\text{dB}, \text{ 平均次数为 } 1$$

$$U = 2u_c = 0.002 \text{ dB}, \text{ 平均次数为 } 64$$

C8 驱动电压输出校准不确定度评定

C8.1 数学模型

采用直接测量方法。

C8.2 不确定度来源

- (1) 数字电压表测量不准引入的标准不确定度分量 u_1 ;
- (2) 测量重复性引入的标准标准不确定度分量 u_2

C8.3 不确定度分量评定

- (1) 数字电压表测量不准引入的标准不确定度分量 u_1

数字电压表测量不准引入的相对标准不确定度分量 u_1 按 B 类评定。由数字电压表的说明书可知, 电压测量的相对不确定度为 $U_{ref} = 0.007\%$ ($k=2$), 则当被测电压为 28.0075V 时, 由数字电压表测量不准引入的标准不确定度分量

$$u_1 = c_1 U / k = 1 \times 28.0075 \times 0.007\% / 2 = 1\text{mV}$$

- (2) 测量重复性引入的标准不确定度分量 u_2

测量重复性引入的标准不确定度分量 u_2 按 A 类评定。用数字电压表重复测量噪声系数分析仪噪声源驱动电压 10 次, 测试数据见下表:

索引	测量值 x_i (V)
1	28.007
2	28.007
3	28.008
4	28.008
5	28.007
6	28.008

7	28.007
8	28.007
9	28.008
10	28.008
平均值 \bar{x}	28.0075

由下式计算得到测量重复性引入的标准不确定度分量为

$$u_2 = \frac{s_n(x)}{\sqrt{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}} = 0.17\text{mV}$$

C8.4 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	引入标准不确定度分量 (mV)
u_1	数字电压表测量不准	B 类	正态	2	1
u_2	测量重复性	A 类			0.17

C8.5 合成标准不确定度；

已知各不确定度分量不相关，则合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 1\text{mV}$$

C8.6 扩展不确定度；

取 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U = k \cdot u_c = 2\text{mV}$$

C9 输入端反射系数模值校准不确定度评定

C9.1 数学模型

采用直接测量方法。

C9.2 不确定度来源

- (1) 网络分析仪测量不准引入的标准不确定度分量 u_1 ；

(2) 测量重复性引入的标准不确定度分量 u_2 。

C9.3 不确定度分量评定

(1) 网络分析仪测量不准引入的标准不确定度分量 u_1

网络分析仪测量不准引入的不确定度分量按 B 类评定, 由网络分析仪的检定证书得知, 反射系数模值测量的不确定度 $U_1=0.02$ ($k=2$), 其引入的不确定度分量 u_1 为:

$$u_1 = c_1 U_1 / k = 1 \times 0.02 / 2 = 0.01$$

(2) 测量重复性引入的标准不确定度分量 u_2

测量重复性引入的标准不确定度分量 u_2 按 A 类评定。用网络分析仪重复测量噪声系数分析仪输入端的反射系数模值 10 次。测试数据如下表所示:

索引	测量值 x_i
1	0.131
2	0.132
3	0.134
4	0.132
5	0.131
6	0.134
7	0.132
8	0.134
9	0.133
10	0.133
平均值 \bar{x}	0.1326

由下式计算得到测量重复性引入的标准不确定度分量为

$$u_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{(n-1)}} = 0.0004$$

C9.4 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	引入的标准不确定度分量
u_1	网络分析仪测量不准	B 类	正态	2	0.01
u_2	测量重复性	A 类			0.0004

C9.5 合成标准不确定度；

已知各不确定度分量不相关，则合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 0.01$$

C9.6 扩展不确定度；

取 $k=2$ ，则扩展不确定度为：

$$U = k \cdot u_c = 2 \times 0.01 = 0.02 \ (k=2)$$