

JJF

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF XXXX—XXXX

微波噪声参数测量系统校准规范

Calibration Specification for Microwave Noise Parameters

Measurement Systems

(征求意见稿)

××××-××-××发布

××××-××-××实施

国家市场监督管理总局发布

微波噪声参数测量系统校准规范
Calibration Specification for Microwave Noise
Parameters Measurement Systems

JJF XXXX—XXXX

归口单位：全国无线电计量技术委员会

主要起草单位：中国电子科技集团公司第十三研究所

中国计量科学研究院

参加起草单位：西安电子科技大学

中国科学院空天信息创新研究院

中电科思仪科技股份有限公司

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：

XXX（中国电子科技集团公司第十三研究所）

XXX（中国电子科技集团公司第十三研究所）

XXX（中国计量科学研究院）

参加起草人：

XXX（西安电子科技大学）

XXX（中国科学院空天信息创新研究院）

XXX（中电科思仪科技股份有限公司）

XXX（中电科思仪科技股份有限公司）

目 录

引言.....	(II)
1 范围.....	(1)
2 术语和定义.....	(1)
2.1 噪声参数.....	(1)
2.2 最小噪声系数.....	(1)
2.3 最佳源反射系数.....	(1)
2.4 等效噪声电阻.....	(1)
3 概述.....	(1)
4 计量特性.....	(2)
4.1 最小噪声系数.....	(2)
4.2 最佳源反射.....	(2)
4.3 等效噪声电阻.....	(2)
5 校准条件.....	(2)
5.1 环境条件.....	(2)
5.2 校准用设备.....	(2)
6 校准项目和校准方法.....	(3)
6.1 校准项目.....	(3)
6.2 校准方法.....	(3)
7 校准结果表达.....	(7)
8 复校时间间隔.....	(8)
附录 A 原始记录内页格式.....	(9)
附录 B 校准证书内页格式.....	(11)
附录 C 不确定度评定示例.....	(13)
附录 D 噪声参数标准值计算方法.....	(18)

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》、JJF1059.1—2012 《测量不确定度评定与表示》、JJF1059.2—2012 《用蒙特卡洛评定测量不确定度》共同构成支撑本规范制定工作的基础性系列文件。

本规范为首次发布。

微波噪声参数测量系统校准规范

1 范围

本规范适用于频率范围 0.8 GHz ~ 50 GHz 同轴微波噪声参数测量系统的校准。

2 术语和定义

2.1 噪声参数 Noise parameter

噪声参数描述二端口网络的噪声系数随源反射系数的变化关系，由最小噪声系数 F_{\min} 、最佳源反射系数 Γ_{opt} 和等效噪声电阻 R_n 共同表征。二端口网络的噪声系数 F 与源反射系数 Γ_s 的关系可通过公式（1）表示：

$$F = F_{\min} + \frac{4R_n}{Z_0} \frac{|\Gamma_s - \Gamma_{\text{opt}}|^2}{(1 - |\Gamma_s|^2) \times |1 + \Gamma_{\text{opt}}|^2} \quad (1)$$

2.2 最小噪声系数 Minimum noise factor

二端口网络能够达到的最低的噪声系数，通常用符号 F_{\min} 表示。最小噪声系数是二端口网络本身固有的噪声下限，无法通过匹配进一步降低。

2.3 最佳源反射系数 Optimum source reflection coefficient

当二端口网络的噪声系数达到最低时，此时二端口网络的源反射系数，通常用符号 Γ_{opt} 表示，包括幅度和相位。

2.4 等效噪声电阻 Equivalent noise resistance

表征二端口网络的噪声系数随源反射系数偏离最优值而恶化的快慢程度，通常用符号 R_n 表示。等效噪声电阻越大，说明二端口网络对源反射系数越敏感，偏离后噪声系数上升越快。

3 概述

微波噪声参数测量系统由阻抗调配器、具有噪声测量功能的矢量网络分析仪（含校准件）、噪声源、微波开关、低噪声放大器构成，其结构框图如图 1 所示。其主要工作原理是通过阻抗调配器调节出不同的源反射系数，并在不同源反射系数下测量微波器件的噪声系数，最终得到该器件的噪声参数。该系统主要用于优化微波封装器件二次匹配设计。

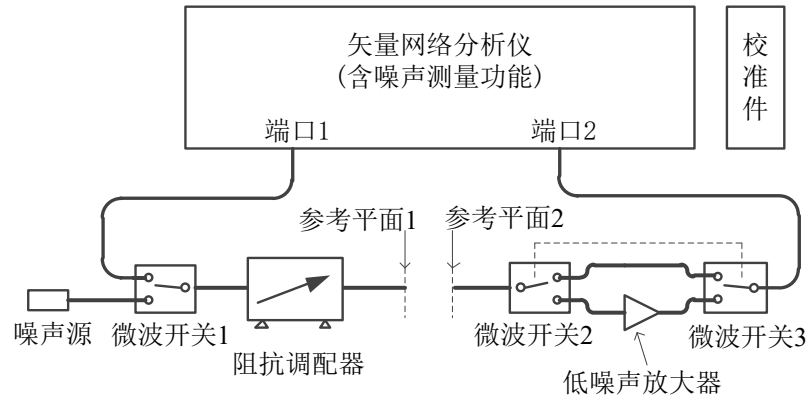


图1 微波噪声参数测量系统结构框图

4 计量特性

4.1 最小噪声系数

频率范围：0.8 GHz ~ 50 GHz；

测量范围：1 dB ~ 10 dB；

测量不确定度：0.1 dB ~ 1.0 dB ($k=2$)。

4.2 最佳源反射系数

频率范围：0.8 GHz ~ 50 GHz；

测量范围：幅度：0 ~ 0.6；

相位： $-180^\circ \sim 180^\circ$ ；

测量不确定度：幅度：0.06 ~ 0.12 ($k=2$)；

相位：当幅度小于 0.02 时， $U=180^\circ$ ($k=2$)；

当幅度不小于 0.02 时， $U=3^\circ \sim 28^\circ$ ($k=2$)。

4.3 等效噪声电阻

频率范围：0.8 GHz ~ 50 GHz；

测量范围：50 Ω ~ 500 Ω ；

相对测量不确定度：8% ~ 12% ($k=2$)。

注：以上指标仅提供参考，不作合格性判定。

5 校准条件

5.1 环境条件

5.1.1 环境温度：23°C \pm 5°C。

5.1.2 相对湿度： $\leq 80\%$ 。

5.1.3 供电电源：220 V \pm 11 V，50 Hz \pm 1 Hz。

5.1.4 其它：无影响仪器正常工作的电磁干扰及机械振动。

5.2 校准用设备

5.2.1 标准衰减器

频率范围：0.8 GHz ~ 50 GHz；

标称衰减量：1 dB、3 dB、10 dB；

标准衰减器的 S 参数范围及不确定度：

S_{11} 、 S_{22} 幅度：0 ~ 0.2， $U = 0.01 \sim 0.05$ ($k = 2$)；

S_{11} 、 S_{22} 相位： $-180^\circ \sim 180^\circ$ ，当幅度小于 0.02 时， $U = 180^\circ$ ($k = 2$)；

当幅度不小于 0.02 时， $U = 10^\circ \sim 50^\circ$ ($k = 2$)；

S_{21} 、 S_{12} 幅度：0.3 ~ 0.9， $U = 0.01 \sim 0.05$ ($k = 2$)；

S_{21} 、 S_{12} 相位： $-180^\circ \sim 180^\circ$ ， $U = 0.5^\circ \sim 2.0^\circ$ ($k = 2$)。

5.2.2 标准失配空气线

25 Ω 无支撑失配空气线，要求如下：

频率范围：0.8 GHz ~ 50 GHz；

标准失配空气线的 S 参数范围及不确定度：

S_{11} 、 S_{22} 幅度：0 ~ 0.6， $U = 0.01 \sim 0.04$ ($k = 2$)；

S_{11} 、 S_{22} 相位： $-180^\circ \sim 180^\circ$ ，当幅度小于 0.02 时， $U = 180^\circ$ ($k = 2$)；

当幅度不小于 0.02 时， $U = 2^\circ \sim 25^\circ$ ($k = 2$)；

S_{21} 、 S_{12} 幅度：0.5 ~ 1， $U = 0.01 \sim 0.05$ ($k = 2$)；

S_{21} 、 S_{12} 相位： $-180^\circ \sim 180^\circ$ ， $U = 0.5^\circ \sim 2.0^\circ$ ($k = 2$)。

6 校准项目和校准方法

6.1 校准项目

校准项目见表 1。

表 1 校准项目表

序号	项目名称	条款
1	最小噪声系数	6.2.3
2	最佳源反射系数	6.2.4
3	等效噪声电阻	6.2.5

6.2 校准方法

6.2.1 外观及工作正常性检查

被校微波噪声参数测量系统的外观应完好，各开关、按键等调节正常，不应有影响电气性能的机械损伤。组成被校微波噪声参数测量系统的各仪器应有说明书及配套附件。

被校微波噪声参数测量系统按技术说明书规定时间预热，预热后应显示正常，矢量网络分析仪自检正常，阻抗调配器初始化正常。

6.2.2 系统自校准

系统自校准在微波噪声参数测量系统工控软件校准向导的提示下进行，自校准过程

中工控软件自动切换微波开关和调节阻抗调配器。系统自校准步骤如下：

a) 按照图 1 连接仪器。根据被校准系统的测量范围设置矢量网络分析仪的扫描类型、频率、扫描点数、中频带宽，其中中频带宽一般小于 200 Hz。

b) 双端口 S 参数校准：如图 2 所示设置微波开关 1、微波开关 2 和微波开关 3 的连接状态，将阻抗调配器初始化到匹配状态，在参考平面 1 和参考平面 2 上依次连接开路、短路、负载、直通校准件或者电子校准件，对被校系统进行全双端口 S 参数校准，并保存校准文件。

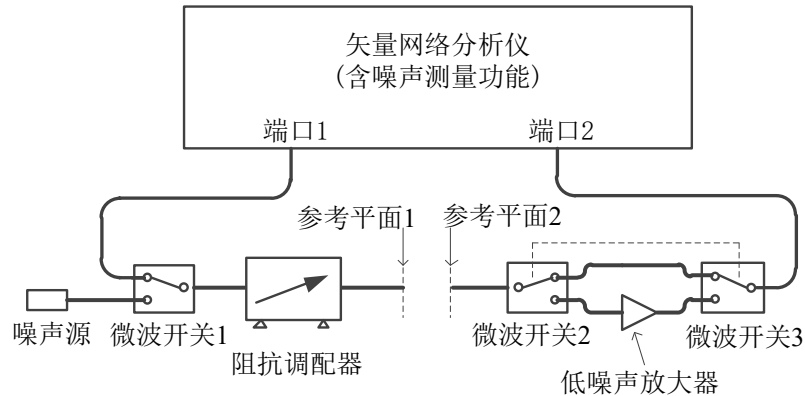


图 2 双端口 S 参数校准示意图

c) 噪声源端口 S 参数校准：如图 3 所示设置微波开关 1、微波开关 2 和微波开关 3 的连接状态，将图 2 中参考平面 1 和参考平面 2 直接连接，移除噪声源，保持阻抗调配器为初始化后的匹配状态，在噪声源参考平面上依次连接开路、短路、负载校准件或者电子校准件，对矢量网络分析仪的端口 2 进行单端口 S 参数校准，并保存校准文件。

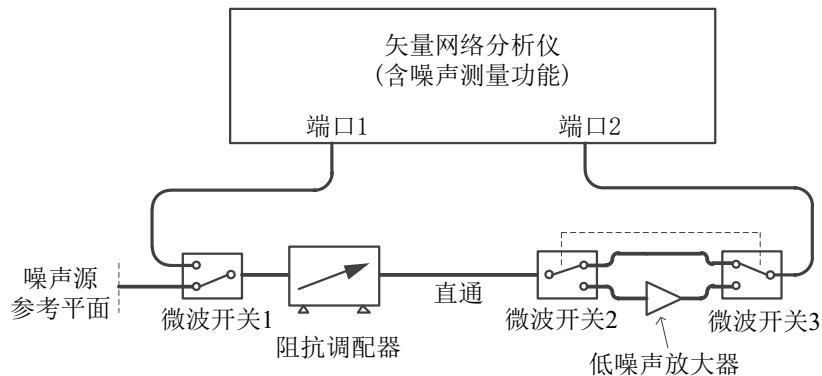


图 3 噪声源端口 S 参数校准示意图

d) 噪声源反射系数测量：在步骤 c) 噪声源端口 S 参数校准完成后，保持阻抗调配器为初始化后的匹配状态，在如图 3 所示的噪声源参考平面上重新连接噪声源，用矢量网络分析仪端口 2 测量噪声源冷态、热态的反射系数。

e) 噪声接收机反射系数测量：如图 4 所示设置微波开关 1、微波开关 2 和微波开关 3 的连接状态，保持阻抗调配器为初始化后的匹配状态，同时保持图 2 中参考平面 1 和参考平面 2 直接连接，给低噪声放大器加电，用矢量网络分析仪端口 1 测量噪声接收机的反射系数。

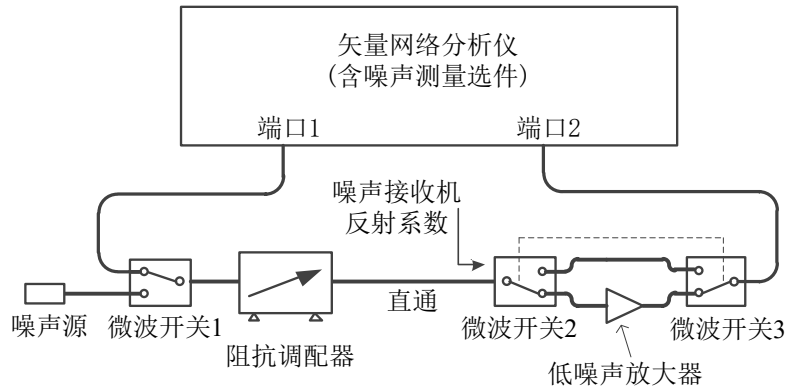


图4 噪声接收机反射系数测量示意图

f) 阻抗调配器校准：如图5所示设置微波开关1、微波开关2和微波开关3的连接状态，通过调节阻抗调配器使系统呈现出不同的阻抗状态，用矢量网络分析仪端口2测量阻抗调配器不同阻抗状态下的源反射系数。一般测量不少于22个阻抗状态（包括1个匹配状态和21个失配状态）。

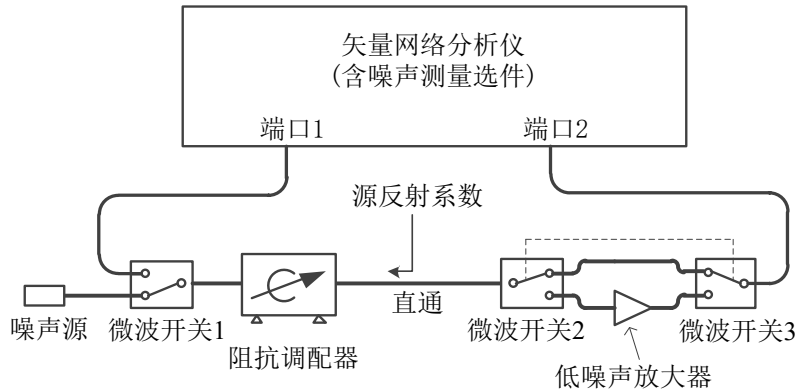


图5 阻抗调配器校准示意图

g) 噪声接收机校准：如图6所示设置微波开关1、微波开关2和微波开关3的连接状态，将阻抗调配器调节到步骤f)中的各种阻抗状态，用矢量网络分析仪内部噪声接收机测量不同阻抗状态下的噪声系数，进而得到被校系统自身的噪声参数（包括最小噪声系数 F_{\min} 、最佳源反射系数 Γ_{opt} 和等效噪声电阻 R_n ），完成系统自校准。

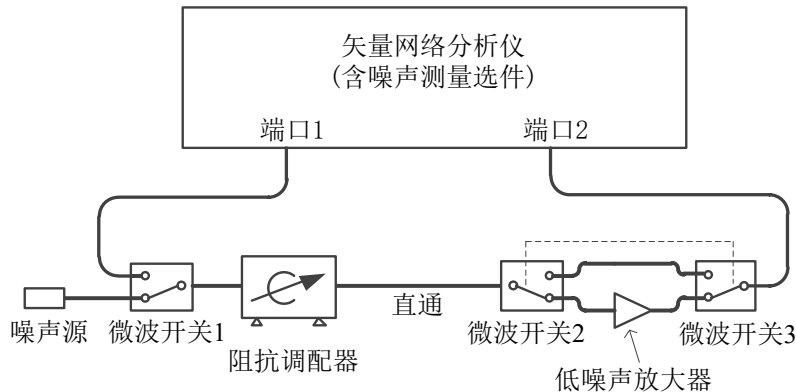


图6 噪声接收机校准示意图

注：

自校准后被校系统自身的最小噪声系数应小于 4 dB。当系统自校准后被校系统自身的最小噪声系数大于 4 dB 时，应在低噪声放大器前插入噪声系数小于 4dB 的低噪声放大器，并重新对系统进行自校准。

6.2.3 最小噪声系数

- a) 按照图 1 连接仪器。
- b) 按照 6.2.2 进行系统自校准。
- c) 如图 7 所示，将标称衰减量为 1 dB 的标准衰减器连接至参考平面 1 和参考平面 2 之间。

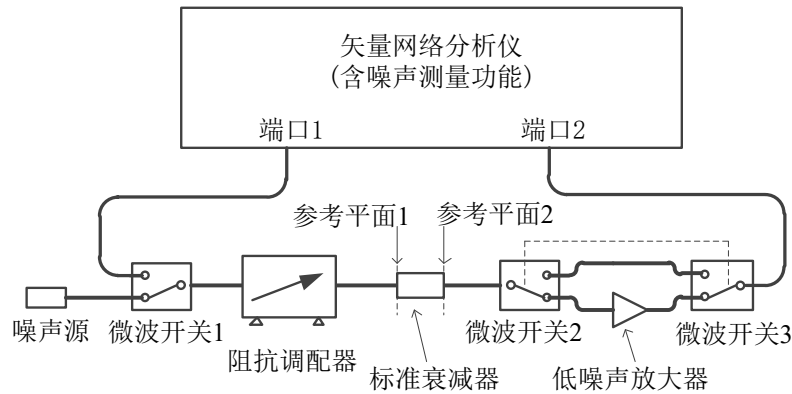


图 7 噪声接收机校准示意图

- d) 调节阻抗调配器，测量标准衰减器的噪声参数（包括最小噪声系数 F_{\min} 、最佳源反射系数 Γ_{opt} 和等效噪声电阻 R_n ），并将最小噪声系数测量结果记录在附录 A 表 A.2 实测值对应列。
- e) 根据标准衰减器溯源证书中的 S 参数，通过附录 D 计算标准衰减器的噪声参数（包括最小噪声系数 F_{\min} 、最佳源反射系数 Γ_{opt} 和等效噪声电阻 R_n ），将标准衰减器最小噪声系数计算结果记录在附录 A 表 A.2 标准值对应列。
- f) 分别更换标称衰减量为 3 dB 和 10 dB 的标准衰减器，重复步骤 d) 到步骤 e)。

6.2.4 最佳源反射系数

- a) 按照 6.2.2 进行系统自校准。
- b) 如图 8 所示，将标准失配空气线和标称衰减量为 10 dB 的标准衰减器级联后，连接至参考平面 1 和参考平面 2 之间。

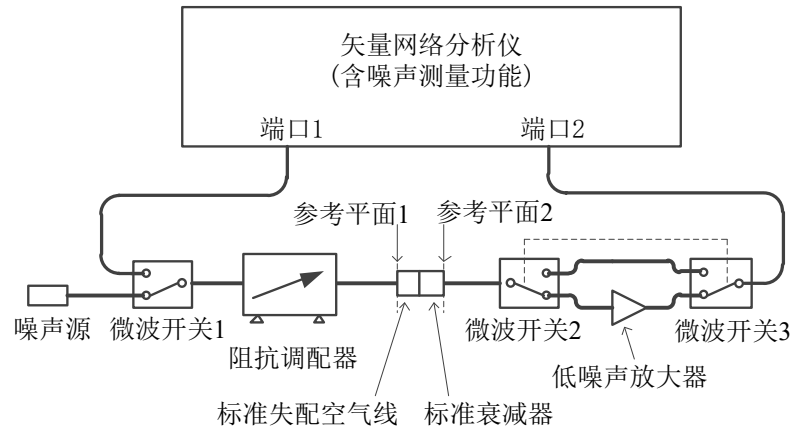


图 8 噪声接收机校准示意图

c) 调节阻抗调配器，测量标准失配空气线和标称衰减量为 10 dB 的标准衰减器级联后的噪声参数（包括最小噪声系数 F_{\min} 、最佳源反射系数 Γ_{opt} 和等效噪声电阻 R_n ），并将最佳源反射系数幅度和相位测量结果分别记录在附录 A 表 A.3 和表 A.4 实测值对应列。

d) 根据标准失配空气线和标准衰减器溯源证书中的 S 参数，通过附录 D 计算二者级联后的噪声参数（包括最小噪声系数 F_{\min} 、最佳源反射系数 Γ_{opt} 和等效噪声电阻 R_n ），将最佳源反射系数幅度和相位计算结果分别记录在附录 A 表 A.3 和表 A.4 标准值对应列。

6.2.5 等效噪声电阻

a) 按照 6.2.2 进行系统自校准。

b) 如图 8 所示，将标准失配空气线和标称衰减量为 10 dB 的标准衰减器级联后，连接至参考平面 1 和参考平面 2 之间。

c) 调节阻抗调配器，测量标准失配空气线和标称衰减量为 10 dB 的标准衰减器级联后的噪声参数（包括最小噪声系数 F_{\min} 、最佳源反射系数 Γ_{opt} 和等效噪声电阻 R_n ），并将等效噪声电阻测量结果记录在附录 A 表 A.5 实测值对应列。

d) 根据标准失配空气线和标准衰减器溯源证书中的 S 参数，通过附录 D 计算二者级联后的噪声参数（包括最小噪声系数 F_{\min} 、最佳源反射系数 Γ_{opt} 和等效噪声电阻 R_n ），将等效噪声电阻计算结果记录在附录 A 表 A.5 标准值对应列。

7 校准结果表达

微波噪声参数测量系统校准后，出具校准证书，校准证书至少应包含以下信息：

- 标题：“校准证书”；
- 实验室名称和地址；
- 进行校准的地点（如果与实验室的地址不同）；
- 证书的唯一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- 客户的名称和地址；
- 被校对象的描述和明确标识；
- 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，应对被校对象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。

8 复校时间间隔

由于复校时间间隔的长短由系统的使用情况、使用者和系统本身质量等诸多因素决定，因此送校单位可根据实际使用情况自主决定复校时间间隔。

为了确保微波噪声参数测量系统在其规定的技术性能下使用，建议复校时间间隔不超过 12 个月。

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 最小噪声系数

频率 / GHz	标准值 / dB	实测值 / dB	测量不确定度 ($k=2$) / dB
1			
2			
3			
...			

表 A.3 最佳源反射系数（幅度）

频率 / GHz	标准值	实测值	测量不确定度 ($k=2$)
1			
2			
3			
...			

表 A.4 最佳源反射系数（相位）

频率 / GHz	标准值 / °	实测值 / °	测量不确定度 ($k=2$) / °
1			
2			
3			
...			

表 A.5 等效噪声电阻

频率 / GHz	标准值 / Ω	实测值 / Ω	测量不确定度 ($k=2$) / Ω
1			
2			
3			
...			

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 最小噪声系数

频率 / GHz	标准值 / dB	实测值 / dB	测量不确定度 ($k=2$) / dB
1			
2			
3			
...			

表 B.3 最佳源反射系数（幅度）

频率 / GHz	标准值	实测值	测量不确定度 ($k=2$)
1			
2			
3			
...			

表 B.4 最佳源反射系数（相位）

频率 / GHz	标准值 / °	实测值 / °	测量不确定度 ($k=2$) / °
1			
2			
3			
...			

表 B.5 等效噪声电阻

频率 / GHz	标准值 / Ω	实测值 / Ω	测量不确定度 ($k=2$) / Ω
1			
2			
3			
...			

附录 C

不确定度评定示例

C.1 最小噪声系数不确定度评定

C.1.1 测量模型

微波噪声参数测量系统测量标准衰减器的最小噪声系数，采用直接测量法，测量结果直接从工控软件中读取，测量模型为：

$$Y = X + \delta \quad (\text{C.1})$$

式中：

X ——被校系统最小噪声系数测量结果；

δ ——被校系统测量重复性引入的影响。

C.1.2 不确定度来源

测量结果的不确定度来源有以下 2 项：

- a) 标准衰减器标准值引入的不确定度分量 u_1 ；
- b) 测量重复性引入的不确定度分量 u_2 。

C.1.3 标准不确定度分量评定

- a) 标准衰减器标准值引入的不确定度分量 u_1 评定

采用 B 类评定方法进行评定。以标称衰减量为 3 dB 的标准衰减器的最小噪声系数为例，在频率 50 GHz 下，由标准衰减器溯源证书给出的 S 参数及测量不确定度为输入量，通过蒙特卡洛法分析得到标准衰减器标准值引入的测量不确定度分量 $u_1 = 0.158$ dB。

- b) 测量重复性引入的不确定度分量 u_2 评定

采用 A 类评定方法进行评定。对 3 dB 标准衰减器的最小噪声系数重复测量 10 次，测试数据如表 C.1 所示。

表 C.1 直接测量法最小噪声系数测量重复性数据

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值 / dB	3.268	3.3287	3.255	3.298	3.286	3.251	3.223	3.275	3.240	3.265

测量重复性的实验标准偏差 $s(x) = 0.023$ dB，按照 A 类方法进行评定，测量重复性引入的不确定度分量 $u_2 = 0.023$ dB。

C.1.4 合成标准不确定度

使用直接测量法测量最小噪声系数标准不确定度汇总如表 C.2 所示。

表 C.2 直接测量法最小噪声系数标准不确定度汇总

测量不确定度来源	评定类型	分布类型	k	测量不确定度分量
标准衰减器标准值 u_1	B	正态	2	0.158 dB
测量重复性 u_2	A	/	/	0.023 dB

两个测量不确定度分量 u_1 、 u_2 相互独立，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 0.160 \text{ dB} \quad (\text{C.2})$$

C.1.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = ku_c = 0.32 \text{ dB} \quad (\text{C.3})$$

C.2 最佳源反射系数不确定度评定

C.2.1 最佳源反射系数幅度不确定度评定

C.2.1.1 测量模型

微波噪声参数测量系统测量失配空气线级联衰减器（以下简称级联标准件）的最佳源反射系数幅度，采用直接测量法，测量结果直接从工控软件中读取，测量模型为：

$$Y = X + \delta \quad (\text{C.4})$$

式中：

X ——被校系统最佳源反射系数幅度测量结果；

δ ——被校系统测量重复性引入的影响。

C.2.1.2 不确定度来源

测量结果的不确定度来源有以下 2 项：

- a) 级联标准件的标准值引入的不确定度分量 u_1 ；
- b) 测量重复性引入的不确定度分量 u_2 。

C.2.1.3 标准不确定度分量评定

- a) 级联标准件的标准值引入的不确定度分量 u_1 评定

采用 B 类评定方法进行评定。在频率 50 GHz 下，由失配空气线和标准衰减器溯源证书给出的 S 参数及测量不确定度为输入量，通过蒙特卡洛法分析得到标准值引入的测量不确定度分量 $u_1 = 0.032$ 。

- b) 测量重复性引入的不确定度分量 u_2 评定

采用 A 类评定方法进行评定。对级联标准件的最佳源反射系数幅度重复测量 10 次，测试数据如表 C.3 所示。

表 C.3 最佳源反射系数幅度测量重复性数据

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值	0.618	0.625	0.614	0.617	0.632	0.608	0.632	0.620	0.615	0.642

测量重复性的实验标准偏差 $s(x) = 0.011$ ，按照 A 类方法进行评定，测量重复性引入的不确定度分量 $u_2 = 0.011$ 。

C.2.1.4 合成标准不确定度

使用直接测量法测量最佳源反射系数幅度标准不确定度汇总如表 C.4 所示。

表 C.4 最佳源反射系数幅度标准不确定度汇总

测量不确定度来源	评定类型	分布类型	k	测量不确定度分量
标准值 u_1	B	正态	2	0.032
测量重复性 u_2	A	/	/	0.011

两个测量不确定度分量 u_1 、 u_2 相互独立，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 0.034 \quad (\text{C.5})$$

C.2.1.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = ku_c = 0.07。 \quad (\text{C.6})$$

C.2.2 最佳源反射系数相位不确定度评定

C.2.2.1 测量模型

微波噪声参数测量系统测量级联标准件的最佳源反射系数相位，采用直接测量法，测量结果直接从工控软件中读取，测量模型为：

$$Y = X + \delta \quad (\text{C.7})$$

式中：

X ——被校系统最佳源反射系数相位测量结果；

δ ——被校系统测量重复性引入的影响。

C.2.2.2 不确定度来源

测量结果的不确定度来源有以下 2 项：

- 级联标准件的标准值引入的不确定度分量 u_1 ；
- 测量重复性引入的不确定度分量 u_2 。

C.2.2.3 标准不确定度分量评定

- 级联标准件的标准值引入的不确定度分量 u_1 评定

采用 B 类评定方法进行评定。标准失配空气线级联衰减量为 10 dB 的标准衰减器在频率 50 GHz 下，当反射系数幅度为 0.3 时，由标准器溯源证书给出的 S 参数及测量不

确定度为输入量，通过蒙特卡洛仿真得到标准值引入的测量不确定度分量 $u_1 = 2.6^\circ$ 。

b) 测量重复性引入的不确定度分量 u_2 评定

采用 A 类评定方法进行评定。对级联标准件的最佳源反射系数相位重复测量 10 次，测试数据如表 C.5 所示。

表 C.5 最佳源反射系数相位测量重复性数据

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值 $/^\circ$	-129.56	-129.63	-130.07	-130.58	-129.78	-130.87	-130.95	-129.20	-129.05	-129.38

测量重复性的实验标准偏差 $s(x) = 0.68^\circ$ ，按照 A 类方法进行评定，测量重复性引入的不确定度分量 $u_2 = 0.68^\circ$ 。

C.2.2.4 合成标准不确定度

使用直接测量法测量最佳源反射系数相位标准不确定度汇总如表 C.6 所示。

表 C.6 最佳源反射系数相位标准不确定度汇总

测量不确定度来源	评定类型	分布类型	k	测量不确定度分量
标准值 u_1	B	正态	2	2.6°
测量重复性 u_2	A	/	/	0.68°

两个测量不确定度分量 u_1 、 u_2 相互独立，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 2.69^\circ \quad (\text{C.8})$$

C.2.2.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = ku_c = 5.4^\circ \quad (\text{C.9})$$

C.3 等效噪声电阻不确定度评定

C.3.1 测量模型

微波噪声参数测量系统测量级联标准件的等效噪声电阻，采用直接测量法，测量结果直接从工控软件中读取，测量模型为：

$$Y = X + \delta \quad (\text{C.10})$$

式中：

X ——被校系统等效噪声电阻测量结果；

δ ——被校系统测量重复性引入的影响。

C.3.2 不确定度来源

测量结果的不确定度来源有以下 2 项：

a) 级联标准件的标准值引入的不确定度分量 u_1 ；

b) 测量重复性引入的不确定度分量 u_2 。

C.3.3 标准不确定度分量评定

a) 级联标准件的标准值引入的不确定度分量 u_1 评定

采用 B 类评定方法进行评定。标准失配空气线级联衰减量为 10 dB 的标准衰减器在频率 50 GHz 下，由标准器溯源证书给出的 S 参数及测量不确定度为输入量，通过蒙特卡洛仿真得到标准值引入的测量不确定度分量 $u_1 = 2.0 \Omega$ 。

b) 测量重复性引入的不确定度分量 u_2 评定

采用 A 类评定方法进行评定。对级联标准件的等效噪声电阻重复测量 10 次，测试数据如表 C.7 所示。

表 C.7 等效噪声电阻测量重复性数据

测量次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值 / Ω	48.32	47.95	47.86	48.05	47.62	47.83	47.85	48.04	47.60	48.22

测量重复性的实验标准偏差 $s(x) = 0.23 \Omega$ ，按照 A 类方法进行评定，测量重复性引入的不确定度分量 $u_2 = 0.23 \Omega$ 。

C.3.4 合成标准不确定度

使用直接测量法测量等效噪声电阻标准不确定度汇总如表 C.8 所示。

表 C.8 等效噪声电阻标准不确定度汇总

测量不确定度来源	评定类型	分布类型	k	测量不确定度分量
标准值 u_1	B	正态	2	2.0Ω
测量重复性 u_2	A	/	/	0.23Ω

两个测量不确定度分量 u_1 、 u_2 相互独立，合成标准不确定度为：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 2.01 \Omega \quad (\text{C.11})$$

C.3.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U = ku_c = 4.0 \Omega \quad (\text{C.12})$$

相对扩展不确定度：

$$U_{\text{rel}} = 9\% \quad (\text{C.13})$$

附录 D

噪声参数标准值计算方法

最小噪声系数、最佳源反射系数（包括幅度和相位）和等效噪声电阻在校准时使用无源器件作为标准件，无源器件的噪声参数可以通过 S 参数计算得到。计算方法如下：

D.1 根据公式 (D.1) 将 S 参数转换为传输矩阵。

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} t_{11} & t_{12} \\ t_{21} & t_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{S_{21}} \begin{bmatrix} 1 & -S_{22} \\ S_{11} & S_{21}S_{12} - S_{11}S_{22} \end{bmatrix} \quad (\text{D.1})$$

D.2 根据公式 (D.2) 将传输矩阵转换为噪声相关矩阵。

$$\mathbf{C} = \mathbf{T} * \mathbf{P}_t * \mathbf{T}^* - \mathbf{P}_t \quad (\text{D.2})$$

式中：

\mathbf{T} ——标准件的传输矩阵；

\mathbf{T}^* ——标准件传输矩阵 \mathbf{T} 的共轭转置矩阵；

\mathbf{P}_t ——常数矩阵， $\mathbf{P}_t = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}$ 。

将噪声相关矩阵 \mathbf{C} 中各元素展开后，公式 (D.2) 可以表示为公式 (D.3)：

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |t_{11}|^2 - |t_{12}|^2 - 1 & \overline{t_{21}t_{11}} - \overline{t_{22}t_{12}} \\ \overline{t_{21}t_{11}} - \overline{t_{22}t_{12}} & |t_{21}|^2 - |t_{22}|^2 + 1 \end{bmatrix} \quad (\text{D.3})$$

式中： $\overline{t_{21}}$ 、 $\overline{t_{22}}$ 代表的 t_{21} 、 t_{22} 的共轭。

D.3 根据公式 (D.4) 至公式 (D.7) 由噪声相关矩阵 \mathbf{C} 计算得到噪声参数标准值。

$$F_{\min} = \frac{c_{11} - c_{22}}{2} + \frac{\sqrt{(c_{11} + c_{22})^2 - 4|c_{12}|^2}}{2} + 1 \quad (\text{D.4})$$

$$|\Gamma_{\text{opt}}| = \frac{c_{11} + c_{22}}{2|c_{12}|} - \sqrt{\left(\frac{c_{11} + c_{22}}{2|c_{12}|}\right)^2 - 1} \quad (\text{D.5})$$

$$\angle \Gamma_{\text{opt}} = \arctan\left(\frac{\text{imag}(c_{12})}{\text{real}(c_{12})}\right) \quad (\text{D.6})$$

$$R_n = \frac{Z_0 |c_{12}|}{4 |\Gamma_{\text{opt}}|} \left(1 + 2 |\Gamma_{\text{opt}}| \cos(\angle \Gamma_{\text{opt}}) + |\Gamma_{\text{opt}}|^2 \right) \quad (\text{D.7})$$

式中：

F_{min} ——最小噪声系数标准值；

$|\Gamma_{\text{opt}}|$ ——最佳源反射幅度标准值；

$\angle \Gamma_{\text{opt}}$ ——最佳源反射相位标准值；

R_n ——等效噪声电阻标准值。
