



中华人民共和国工业和信息化部

电子计量技术规范

JJF（电子）XXXX-20XX

射频微波探针校准规范

Calibration Specification for RF & Microwave Probes

（报批稿）

××××-××-××发布

××××-××-××实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

射频微波探针校准规范

Calibration Specification for RF &
Microwave Probes

JJF（电子）XXXX—20XX

归口单位：中国电子技术标准化研究院

主要起草单位：中国电子科技集团公司第十三研究所

中国电子技术标准化研究院

本规范技术条文委托起草单位负责解释

本规范主要起草人：

刘 晨（中国电子科技集团公司第十三研究所）

吴爱华（中国电子科技集团公司第十三研究所）

王一帮（中国电子科技集团公司第十三研究所）

李 洁（中国电子技术标准化研究院）

参 加 起 草 人：

霍 晔（中国电子科技集团公司第十三研究所）

王 浩（中国电子科技集团公司第十三研究所）

孙 静（中国电子科技集团公司第十三研究所）

目 录

1	范围	1
2	引用文件	1
3	术语和计量单位	1
3.1	插入损耗	1
3.2	回波损耗	1
4	概述	1
5	计量特性	2
5.1	插入损耗	2
5.2	回波损耗	2
6	校准条件	2
6.1	环境条件	2
6.2	测量标准和其他设备	2
7	校准项目和校准方法	3
7.1	校准项目	3
7.2	外观及压痕检查	3
7.3	插入损耗	3
7.4	回波损耗	4
8	校准结果表达	6
9	复校时间间隔	7
附录 A	原始记录格式	8
附录 B	校准证书内页格式	9
附录 C	测量不确定度评定示例	10

引 言

本规范依据 JJF 1071—2010 《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1059.1—2012 《测量不确定度评定与表示》编写。

本规范为首次发布。

射频微波探针校准规范

1 范围

本规范适用于频率范围为 10 MHz~67 GHz 射频微波探针的校准。

2 引用文件

本规范引用了下列文件：

GB/T 25915.1《洁净室及相关受控环境》第 1 部分：按粒子浓度划分空气洁净度等级（Cleanrooms and associated environments—Part 1: Classification of air cleanliness by particle concentration）

注：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 术语和计量单位

3.1 插入损耗

将二端口网络（器件）插入传输系统后，引起的信号衰减。其数值等于插入前负载端接收到的功率，与插入后同一负载端接收到的功率之比，以分贝（dB）表示。

3.2 回波损耗

在某一端口处，入射波功率与同一端口反射波功率之比，以分贝（dB）表示。

4 概述

射频微波探针是一种高频精密测试互联器件，用于实现微波测量仪器（如矢量网络分析仪、信号源、频谱分析仪等）与晶圆的信号连接，完成 S 参数、功率、噪声等射频微波特性测量。射频微波探针包括射频接口、探针主体、吸收材料、低损耗电缆、共面波导（CPW）转换、探针头等，其结构如图 1 所示。

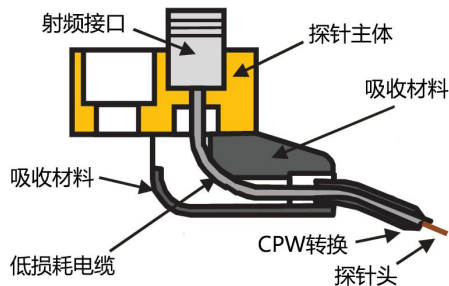


图 1 射频微波探针结构示意图

5 计量特性

5.1 插入损耗

频率测量范围：10 MHz ~ 67 GHz；

插入损耗测量范围：0 dB ~ 4 dB；

插入损耗测量不确定度： $U = 0.15 \text{ dB} \sim 0.4 \text{ dB}$ ($k=2$)。

5.2 回波损耗

频率测量范围：10 MHz ~ 67 GHz；

回波损耗测量范围：3 dB ~ 40 dB；

回波损耗测量不确定度： $U = 0.5 \text{ dB} \sim 5 \text{ dB}$ ($k=2$)。

注：以上范围及指标仅供参考，不作为合格判断依据。

6 校准条件

6.1 环境条件

6.1.1 环境温度： $23^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ 。

6.1.2 环境相对湿度： $\leq 80\%$ 。

6.1.3 供电电源： $(220 \pm 11) \text{ V}$ ，频率： $(50 \pm 1) \text{ Hz}$ 。

6.1.4 其他：周围无影响仪器正常工作的电磁干扰和机械振动，宜在按照 GB/T 25915.1 要求，洁净度级别优于 ISO 8 级的洁净环境中进行。

注：如果校准环境条件不满足优于 ISO 8 级的洁净环境，校准时环境洁净度需与被校准射频微波探针实际使用时的环境洁净度要求一致。

6.2 测量标准和其他设备

6.2.1 矢量网络分析仪

频率范围覆盖被校准射频微波探针的频率范围。

a) 同轴校准后

S_{21} 、 S_{12} 幅度：0 dB ~ 20 dB， $U = 0.15 \text{ dB} \sim 0.30 \text{ dB}$ ($k=2$)；

S_{11} 、 S_{22} 幅度：0 ~ 1， $U = 0.015 \sim 0.025$ ($k=2$)。

b) 在片校准后

S_{21} 、 S_{12} 幅度：0 dB ~ 20 dB， $U = 0.15 \text{ dB} \sim 0.7 \text{ dB}$ ($k=2$)；

S_{11} 、 S_{22} 幅度：0 ~ 1， $U = 0.012 \sim 0.025$ ($k=2$)。

6.2.2 同轴负载标准件

频率范围覆盖被校准射频微波探针的频率范围；

反射系数 ≤ 0.05 。

6.2.3 在片直通标准件

频率范围覆盖被校准射频微波探针的频率范围；
插入损耗 ≤ 0.08 dB。

6.2.4 在片负载标准件

频率范围覆盖被校准射频微波探针的频率范围；
电阻标称值 $50\ \Omega$ ，最大允许误差： $\pm 0.3\%$ 。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

表 1 校准项目一览表

序号	校准项目	校准方法条款
1	外观及压痕检查	7.2
2	插入损耗	7.3
3	回波损耗	7.4

7.2 外观及压痕检查

被校准的射频微波探针外包装或者探针主体明显位置应标注探针的针尖形式、探针间距等信息，探针主体明显位置应标注探针序列号或者其它能够识别该探针的唯一性标识。

用显微镜观察被校准射频微波探针针尖，每个针尖应清晰可见且长度一致，没有粘连杂质；射频微波探针调平后，用显微镜观察探针压痕，每个针尖的压痕应清晰可见并且深度一致，将检查结果记录于附录 A 表 A.1 中。

7.3 插入损耗

7.3.1 矢量网络分析仪按照说明书要求进行预热。

7.3.2 根据被校准射频微波探针的频率范围设置矢量网络分析仪起始、终止频率，校准频率应覆盖被校准射频微波探针频率范围的高、中、低端。

7.3.3 按说明书要求设置矢量网络分析仪的端口功率和中频带宽。如无特殊要求，端口功率一般选择矢量网络分析仪初始化后默认功率值，中频带宽设置为 100 Hz。

7.3.4 设置矢量网络分析仪的测量参数为 S_{11} ，测量数据格式为分贝 (dB)；

7.3.5 按图 2 将射频微波电缆一端连接到矢量网络分析仪的端口 1，另一端作为同轴参考平面，使用同轴机械校准件或者电子校准件在同轴参考平面上对矢量网络分析仪进行单端口校准。

7.3.6 按图 3 将被校准射频微波探针固定在微波探针台的探针座上，被校准射频微波探针的射频接口连接到 7.3.5 中同轴参考平面，探针头悬浮在空气中，并且距离微波探针台的载片台大于 $200\ \mu\text{m}$ 。

7.3.7 从矢量网络分析仪上读取 S_{11} 测量值，按式（1）计算被校准微波射频探针的插入损耗，并将测量结果和计算结果记录在附录 A 表 A.2 中。

$$IL = -\frac{S_{11}}{2} \tag{1}$$

式中：
 IL ——被校准射频微波探针的插入损耗，dB；
 S_{11} ——矢量网络分析仪 S_{11} 幅度测量值，dB。

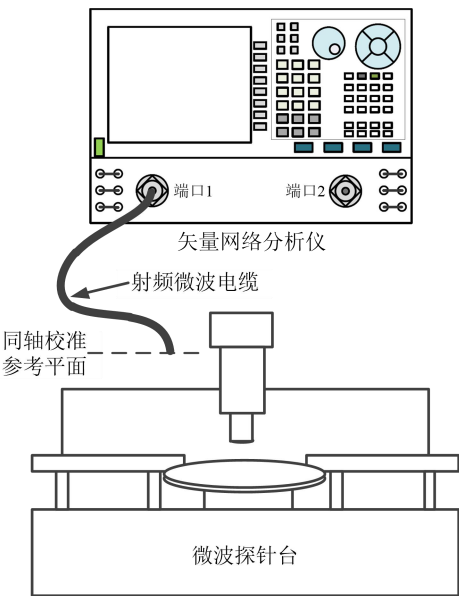


图 2 同轴参考平面示意图

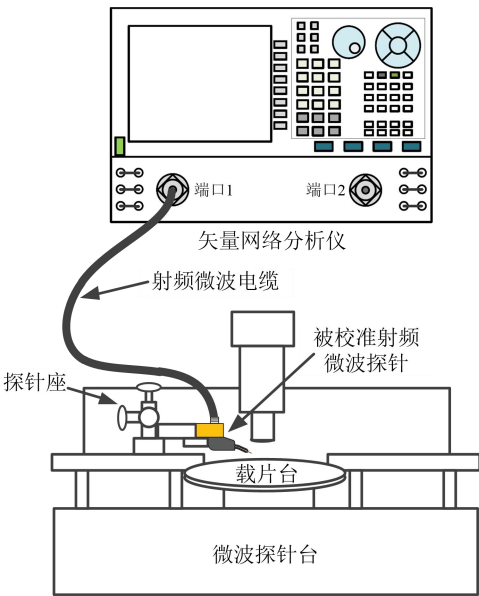


图 3 插入损耗校准连接示意图

7.4 回波损耗

7.4.1 按照 7.3.1 至 7.3.5 设置并校准矢量网络分析仪。

7.4.2 按图 4 在微波探针台的载片台上放置在片负载标准件，将被校准射频微波探针固定在微波探针台的探针座上，被校准射频微波探针的射频接口连接到 7.3.5 的同轴参考平面，调节探针座，使被校准射频微波探针的探针头压在在片负载标准件上，并保持良好物理接触。

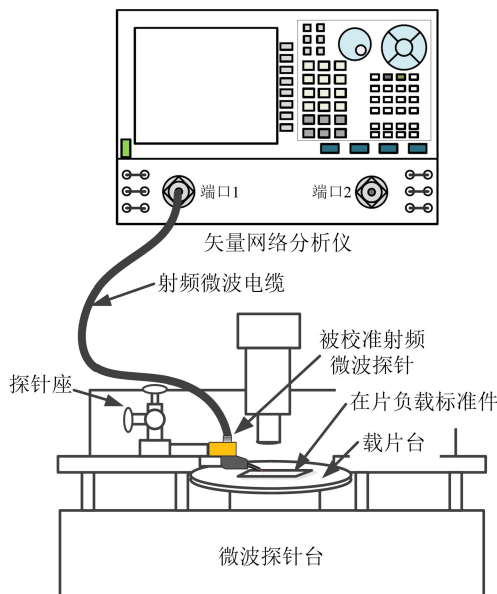


图 4 射频接口回波损耗校准连接示意图

7.4.3 从矢量网络分析仪上读取 S_{11} 测量值，按式 (2) 计算被校准微波射频探针射频接口的回波损耗，并将 S_{11} 测量结果和回波损耗的计算结果记录在附录 A 表 A.3 中。

$$RL_{\text{coax}} = -S_{11} \quad (2)$$

式中：

RL_{coax} ——被校准射频微波探针射频接口的回波损耗，dB；

S_{11} ——矢量网络分析仪 S_{11} 幅度测量值，dB。

7.4.4 设置矢量网络分析仪测量参数为 S_{22} ，测量数据格式为分贝 (dB)；

7.4.5 按照图 5 将标准射频微波探针固定在微波探针台的探针座上，矢量网络分析仪端口 2 通过射频微波电缆连接到标准射频微波探针的射频接口，标准射频微波探针的探针头作为在片参考平面，使用在片校准件在在片参考平面上对矢量网络分析仪进行单端口校准。

7.4.6 按照图 6 将被校准射频微波探针固定微波探针台的另一个探针座上，被校准射频微波探针的射频接口连接同轴负载标准件。

7.4.7 微波探针台的载片台上放置在片直通标准件，调节两个探针座，使被校准射频微波探针和标准射频微波探针的探针头分别压在在片直通标准件的左、右两端，并保持良好物理接触。

7.4.8 从矢量网络分析仪上读取 S_{22} 测量值，按式 (3) 计算被校准微波射频探针探针头的回波损耗，并将 S_{22} 测量结果和回波损耗的计算结果记录在附录 A 表 A.4 中。

$$RL_{\text{wafer}} = -S_{22} \quad (3)$$

式中：

RL_{wafer} ——被校准射频微波探针探针头的回波损耗，dB；

S_{22} ——矢量网络分析仪 S_{22} 幅度测量值，dB。

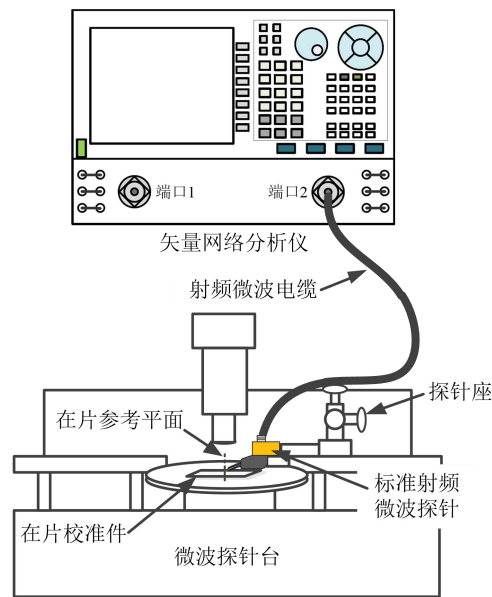


图 5 在片参考平面示意图

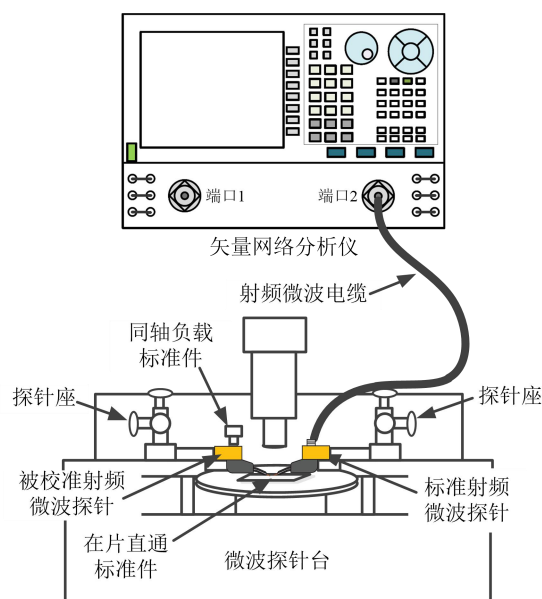


图 6 探针头回波损耗校准连接示意图

8 校准结果表达

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。

9 复校时间间隔

由于复校时间间隔的长短是由射频微波探针的使用情况、使用者、射频微波探针本身质量等诸因素所决定的。建议射频微波探针复校时间间隔为 1 年, 修理或调整后的射频微波探针应进行校准。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。

附录 A

原始记录格式

A.1 外观及压痕检查

表 A.1 外观及工作正常性检查

检查项目	检查结果
外观	
压痕	

A.2 插入损耗

表 A.2 插入损耗

频率/GHz	S_{11} 测量值/dB	插入损耗/dB	测量不确定度/dB ($k=2$)

A.3 回波损耗

表 A.3 射频接口回波损耗

频率/GHz	S_{11} 测量值/dB	回波损耗/dB	测量不确定度/dB ($k=2$)

表 A.4 探针头回波损耗

频率/GHz	S_{22} 测量值/dB	回波损耗/dB	测量不确定度/dB ($k=2$)

附录 B

校准证书内页格式

B.1 外观及压痕检查

表 B.1 外观及工作正常性检查

检查项目	检查结果
外观	
压痕	

B.2 插入损耗

表 B.2 插入损耗

频率/GHz	插入损耗/dB	测量不确定度/dB ($k=2$)

B.3 回波损耗

表 B.3 射频接口回波损耗

频率/GHz	回波损耗/dB	测量不确定度/dB ($k=2$)

表 B.4 探针头回波损耗

频率/GHz	回波损耗/dB	测量不确定度/dB ($k=2$)

附录 C

测量不确定度评定示例

C.1 插入损耗测量不确定度评定

C.1.1 测量模型

射频微波探针插入损耗的测量模型为:

$$IL = -\frac{S_{11}}{2} \quad (\text{C.1})$$

式中:

IL ——被校准射频微波探针的插入损耗, dB;

S_{11} ——矢量网络分析仪 S_{11} 幅度测量值, dB。

C.1.2 不确定度来源

- 矢量网络分析仪测量 S_{11} 幅度不准确引入的不确定度 u_1 ;
- 测量重复性引入的不确定度 u_2 。

C.1.3 标准不确定度评定

C.1.3.1 矢量网络分析仪测量 S_{11} 幅度不准确引入的不确定度 u_1

按照 B 类评定方法进行评定。根据矢量网络分析仪校准证书, 以插入损耗测量结果 1.0 dB 为例, 此时矢量网络分析仪 S_{11} 幅度的测量结果 -2.0 dB (线性值 0.79), 相对扩展不确定度为 3%, 对应 0.26 dB。扩展因子 $k=2$, 因此 S_{11} 幅度测量结果的标准不确定度 $u_{S11} = 0.13$ dB。因此由矢量网络分析仪测量 S_{11} 幅度不准确引入的标准不确定度:

$$u_1 = \frac{u_{S11}}{2} = 0.07 \text{ dB} \quad (\text{C.2})$$

C.1.3.2 测量重复性引入的不确定度 u_2

按照 A 类评定方法进行评定。在相同条件下对插入损耗重复测量 10 次, 测量数据如表 C.1 所示。

表 C.1 插入损耗重复性测量数据

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值/dB	1.12	1.06	1.09	1.07	1.17	1.09	1.20	1.06	1.12	1.18

插入损耗测量结果的平均值:

$$\bar{x} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i = 1.12 \text{ dB} \quad (\text{C.3})$$

根据贝塞尔公式计算单次测量值的试验标准偏差:

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{10-1} \sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2} = 0.05 \text{ dB} \quad (\text{C.4})$$

由测量重复性引入的标准不确定度:

$$u_2 = s(x_i) = 0.05 \text{ dB} \quad (\text{C.5})$$

C.1.4 合成标准不确定度

表 C.2 标准不确定度汇总表

测量不确定度来源	评定方法	分布概率	k	标准不确定度/dB
矢量网络分析仪测量 S_{11} 幅度不准确引入的不确定度 u_1	B	正态	2	0.07
测量重复性引入的不确定度 u_2	A	/	/	0.05

u_1 、 u_2 相互独立，灵敏系数为 1，插入损耗合成标准不确定度：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 0.09 \text{ dB} \quad (\text{C.6})$$

C.1.5 扩展不确定度

取 $k=2$ ，插入损耗的扩展不确定度：

$$U = ku_c = 0.18 \text{ dB} \quad (\text{C.7})$$

C.2 射频接口回波损耗测量不确定度的评定

C.2.1 测量模型

射频微波探针射频接口回波损耗的测量模型为：

$$RL_{\text{coax}} = -S_{11} \quad (\text{C.8})$$

式中：

RL_{coax} ——被校准射频微波探针射频接口的回波损耗，dB；

S_{11} ——矢量网络分析仪 S_{11} 幅度测量值，dB。

C.2.2 不确定度来源

- 矢量网络分析仪测量 S_{11} 幅度不准确引入的不确定度 u_1 ；
- 在片负载标准件不准确引入的不确定度 u_2 ；
- 测量重复性引入的不确定度 u_3 。

C.2.3 标准不确定度评定

C.2.3.1 矢量网络分析仪测量 S_{11} 幅度不准确引入的不确定度 u_1

按照 B 类评定方法进行评定。根据矢量网络分析仪校准证书，当矢量网络分析仪 S_{11} 测量结果为 -15 dB（线性值 0.18）时，相对扩展不确定度为 10%，对应 0.87 dB，扩展因子 $k=2$ ，因此由矢量网络分析仪测量 S_{11} 幅度不准确引入的标准不确定度：

$$u_1 = 0.44 \text{ dB} \quad (\text{C.9})$$

C.2.3.2 在片负载标准件不准确引入的不确定度 u_2

测量射频接口回波损耗时需要在被测探针的在片端口处连接在片负载标准件，在片负载标准件不准确引入的测量不确定度按照 B 类评定方法进行评定。在片校准件技术

文档中给出在片负载标准件最大允许误差为 0.3%，考虑到在片负载标准的其它分布参数，给定在片负载标准件最大偏离标准值 $\pm 3\%$ ，假设为均匀分布，取 $k=\sqrt{3}$ ，半区间宽度为 1.73%，对应 0.15 dB。因此由在片负载标准件不准确引入的标准不确定度：

$$u_2 = 0.15 \text{ dB} \quad (\text{C.10})$$

C.2.3.3 测量复性引入的不确定度 u_3

按照 A 类评定方法进行评定。在相同条件下对射频接口回波损耗重复测量 10 次，测量数据如表 C.3 所示。

表 C.3 射频接口回波损耗重复性测量数据

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值/dB	15.9	15.6	16.3	16.8	16.3	15.8	15.8	16.1	15.7	16.0

射频接口回波损耗测量结果的平均值：

$$\bar{x} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i = 16.03 \text{ dB} \quad (\text{C.11})$$

根据贝塞尔公式计算单次测量值的试验标准偏差：

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{10-1} \sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2} = 0.36 \text{ dB} \quad (\text{C.12})$$

由测量重复性引入的标准不确定度：

$$u_3 = s(x_i) = 0.36 \text{ dB} \quad (\text{C.13})$$

C.2.4 合成标准不确定度

表 C.4 标准不确定度汇总表

测量不确定度来源	评定方法	概率分布	k	标准不确定度/dB
矢量网络分析仪测量 S_{11} 幅度不准确引入的不确定度 u_1	B	正态	2	0.44
在片负载标准件不准确引入的不确定度 u_2	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.15
测量重复性引入的不确定度 u_3	A	/	/	0.36

u_1 、 u_2 、 u_3 相互独立，灵敏系数为 1，射频接口回波损耗合成标准不确定度：

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 0.59 \text{ dB} \quad (\text{C.14})$$

C.2.5 扩展不确定度

取 $k=2$ ，射频接口回波损耗的扩展不确定度：

$$U = ku_c = 1.2 \text{ dB} \quad (\text{C.15})$$

C.3 探针头回波损耗测量不确定度的评定

C.3.1 测量模型

探针头回波损耗的测量模型为：

$$RL_{\text{wafer}} = -S_{22} \quad (\text{C.16})$$

式中：

RL_{wafer} ——被校准射频微波探针探针头回波损耗，dB；

S_{22} ——矢量网络分析仪 S_{22} 幅度测量值，dB。

C.3.2 不确定度来源

- a) 矢量网络分析仪在片测量 S_{22} 幅度不准确引入的不确定度 u_1 ；
- b) 同轴负载标准件不准确引入的不确定度 u_2 ；
- c) 在片直通标准件不准确引入的不确定度 u_3 ；
- d) 测量重复性引入的不确定度 u_4 。

C.3.3 测量不确定度分量的评定

C.3.3.1 矢量网络分析仪在片测量 S_{22} 幅度不准确引入的不确定度 u_1

按照 B 类评定方法进行评定。根据在片矢量网络分析仪校准证书，当矢量网络分析仪在片测量 S_{22} 测量的测量结果为 -17 dB（线性值为 0.14）时，相对扩展不确定度为 15%，对应 1.3 dB，扩展因子 $k=2$ ，因此由矢量网络分析仪测量 S_{22} 幅度不准确引入的标准不确定度：

$$u_1 = 0.65 \text{ dB} \quad (\text{C.17})$$

C.3.3.2 同轴负载标准件不准确引入的不确定度 u_2

测量探针头回波损耗需要在被校准射频微波探针的射频接口处连接负载标准，同轴负载标准件不准确引入的测量不确定度按照 B 类评定方法进行评定。根据经验，同轴负载标准件的反射系数小于 0.05，相当于阻抗最大偏离 10%，假设为均匀分布，取 $k=\sqrt{3}$ ，半区间宽度为 5.8%，对应 0.51 dB，因此由同轴负载标准件不准确引入的标准不确定度：

$$u_2 = 0.51 \text{ dB} \quad (\text{C.18})$$

C.3.3.3 在片直通标准件不准确引入的不确定度 u_3

按照 B 类评定方法进行评定。根据经验，在片直通标准件 S_{21} 最大值 0.08 dB，服从均匀分布，取 $k=\sqrt{3}$ ，由此产生的测量不确定度分量：

$$u_3 = 0.05 \text{ dB} \quad (\text{C.19})$$

C.3.3.4 矢量网络分析仪测量 S_{22} 反射幅度重复性引入的不确定度 u_4

按照 A 类评定方法进行评定。在相同条件下对探针头回波损耗重复测量 10 次，测量数据如表 C.5 所示。

表 C.5 探针头回波损耗重复性测量数据

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值/dB	16.5	16.6	17.3	17.2	17.0	16.4	16.7	17.1	16.4	17.0

探针头回波损耗测量结果的平均值:

$$\bar{x} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} x_i = 16.82 \text{ dB} \quad (\text{C.20})$$

根据贝塞尔公式计算单次测量值的试验标准偏差:

$$s(x_i) = \sqrt{\frac{1}{10-1} \sum_{i=1}^{10} (x_i - \bar{x})^2} = 0.34 \text{ dB} \quad (\text{C.21})$$

由测量重复性引入的标准不确定度:

$$u_4 = s(x_i) = 0.34 \text{ dB} \quad (\text{C.22})$$

C.3.4 合成标准不确定度

表 C.6 标准不确定度汇总表

测量不确定度来源	评定方法	概率分布	k	标准不确定度/dB
矢量网络分析仪测量 S_{22} 幅度不准确引入的不确定度 u_1	B	正态	2	0.65
同轴负载标准件不准确引入的不确定度 u_2	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.51
在片直通标准件不准确引入的不确定度 u_3	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.05
测量重复性引入的不确定度 u_4	A	/	/	0.34

u_1 、 u_2 、 u_3 、 u_4 相互独立, 灵敏系数为 1, 探针头回波损耗合成标准不确定度:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = 0.90 \text{ dB} \quad (\text{C.23})$$

C.3.5 扩展不确定度

取 $k=2$, 探针头回波损耗的扩展不确定度:

$$U = ku_c = 1.8 \text{ dB} \quad (\text{C.24})$$