



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) 001-2024

在片S参数标准件校准规范

Calibration Specification for On-wafer S-parameter Standards

(征求意见稿)

××××-××-××发布

××××-××-××实施

中华人民共和国工业和信息化部 发布

在片S参数标准件校准规范

Calibration Specification for On-wafer
S-parameter Standards

JJF(电子) 001—2024

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
西安电子科技大学

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：

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）
霍 晔（中国电子科技集团公司第十三研究所）
王 海（西安电子科技大学）

参加起草人：

刘 晨（中国电子科技集团公司第十三研究所）
栾 鹏（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）
王 浩（中国电子科技集团公司第十三研究所）

目 录

引言.....	II
1 范围	1
2 引用文件	1
3 概述	1
4 计量特性	1
4.1 S_{11} 、 S_{22} 模值	1
4.2 S_{11} 、 S_{22} 相位	1
4.3 S_{21} 、 S_{12} 模值	1
4.4 S_{21} 、 S_{12} 相位	1
5 校准条件	2
5.1 环境条件	2
5.2 校准用设备	错误!未定义书签。
6 校准项目和校准方法	2
6.1 校准项目	2
6.2 外观及工作正常性检查	3
6.3 校准方法	3
7 校准结果表达	5
8 复校时间间隔	5
附录 A 原始记录格式	6
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	12

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。

在片 S 参数标准件校准规范

1 范围

本规范适用于频率范围 1GHz~40GHz 在片 S 参数标准件的校准。

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

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 概述

在片 S 参数标准件可实现在片测量系统的校准验证，如在片 S 参数测量系统、在片噪声参数测量系统、在片负载牵引测量系统等。

在片 S 参数标准件由反射模值标准件、反射相位标准件、传输模值标准件和传输相位标准件组成，包括失配负载、衰减器、传输线等。结构示意图如图 1 所示。

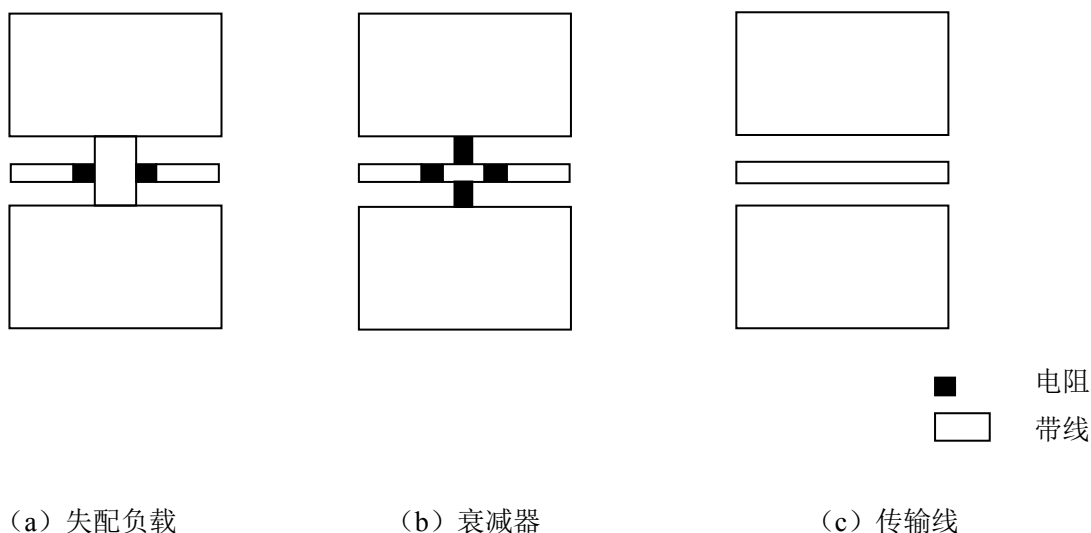


图 1 在片 S 参数标准件结构示意图

4 计量特性

4.1 S_{11} 、 S_{22} 模值

频率范围：1GHz~40GHz；

S_{11} 、 S_{22} 模值：0.05~0.90；

测量不确定度： $U=0.010\sim0.10$ ($k=2$)。

4.2 S_{11} 、 S_{22} 相位

频率范围：1GHz~40GHz；

S_{11} 、 S_{22} 相位： $-180^{\circ}\sim180^{\circ}$ ；

测量不确定度： $U=2^{\circ}\sim20^{\circ}$ ($k=2$)。

4.3 S_{21} 、 S_{12} 模值

频率范围：1GHz~40GHz；

S_{21} 、 S_{12} 模值：0dB~40dB；

测量不确定度： $U=0.07\text{ dB}\sim0.50\text{ dB}$ ($k=2$)。

4.4 S_{21} 、 S_{12} 相位

频率范围: 1GHz~40GHz;

S_{21} 、 S_{12} 相位: $-180^{\circ}\sim 180^{\circ}$;

测量不确定度: $U=0.5^{\circ}\sim 5.0^{\circ}(k=2)$ 。

5 校准条件

5.1 环境条件

a) 环境温度: $23^{\circ}\text{C}\pm 3^{\circ}\text{C}$, 校准过程中温度变化不超过 $\pm 2^{\circ}\text{C}$;

b) 相对湿度: $\leq 80\%$;

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

d) 净化环境: 按照 GB/T 25915.1 要求, 优于 ISO 8 级;

e) 校准环境无强辐射源和明显振动。

5.2 测量标准和其它设备

测量标准和其它设备应经过计量技术机构检定或校准, 满足校准使用要求, 并在有效期内。测量标准为网络分析仪在片测量系统, 主要由多线 TRL 校准件、矢量网络分析仪、多线 TRL 校准软件、微波探针、微波探针台等组成, 指标如下:

5.2.1 多线 TRL 校准件

a) 传输线长度: $200\mu\text{m}\sim 21000\mu\text{m}$, 最大允许误差: $\pm 5\mu\text{m}$;

传输线数量 > 3 个;

b) 开路标准或短路标准: 延迟线长度 $\leq 300\mu\text{m}$, 最大允许误差: $\pm 5\mu\text{m}$ 。

5.2.2 矢量网络分析仪

a) 频率覆盖被校标准件的范围;

b) S_{21} 、 S_{12} 模: $0\sim 60\text{dB}$, $U=0.16\text{dB}\sim 0.40\text{dB}$ ($k=2$);

c) S_{21} 、 S_{12} 相位: $-180^{\circ}\sim 180^{\circ}$, $U=0.8^{\circ}\sim 1.6^{\circ}$ ($k=2$);

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

5.2.3 微波探针

a) 频率覆盖被校标准件的范围;

b) 微波探针形式: 地-信号-地 (GSG), 针尖距 $150\mu\text{m}$ 或 $100\mu\text{m}$;

c) 插入损耗: $\leq 1\text{dB}$;

d) 回波损耗: $\geq 15\text{dB}$ 。

5.2.4 微波探针台

a) X、Y 轴方向移动距离覆盖多线 TRL 校准件和被校标准件的最大尺寸;

移动准确度: $\pm 3\mu\text{m}$;

b) Z 轴方向移动准确度: $\pm 3\mu\text{m}$ 。

5.2.5 网络分析仪在片测量系统

a) 频率覆盖被校标准件的范围;

b) S_{21} 、 S_{12} 模: $0\sim 40\text{dB}$, $U=0.07\text{dB}\sim 0.40\text{dB}$ ($k=2$);

c) S_{21} 、 S_{12} 相位: $-180^{\circ}\sim 180^{\circ}$, $U=0.8^{\circ}\sim 3.0^{\circ}$ ($k=2$);

d) S_{11} 、 S_{22} 模: $0\sim 0.9$, $U=0.008\sim 0.03$ ($k=2$);

e) S_{11} 、 S_{22} 相位: $-180^{\circ}\sim 180^{\circ}$, $U=1.5^{\circ}\sim 15^{\circ}$ ($k=2$)。

6 校准项目和校准方法

6.1 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	S_{11} 、 S_{22} 模值	6.3.1
2	S_{11} 、 S_{22} 相位	6.3.2
3	S_{21} 、 S_{12} 模值	6.3.3
4	S_{21} 、 S_{12} 相位	6.3.4

6.2 外观及工作正常性检查

被校在片 S 参数标准件不应有影响校准的缺陷，表面无影响量值的污垢等杂质，金属带线不应脱落，其接触压点应无明显裂痕，压点间距与微波探针间距匹配。

6.3 校准方法

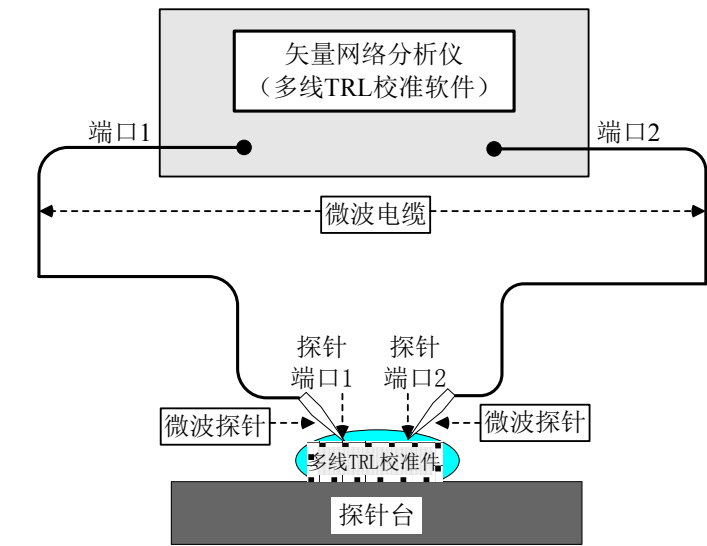


图 2 网络分析仪在片测量系统自校准示意图

- a) 网络分析仪在片测量系统按照图 2 所示搭建，预热 30min 以上；
- b) 网络分析仪在片测量系统按测量要求，设置扫描类型、频率、扫描点数、平均次数、中频带宽，中频带宽小于 200Hz；
- c) 连接多线 TRL 校准件于网络分析仪在片测量系统的探针端口 1 和探针端口 2，采用多线 TRL 校准方法对系统进行全双端口校准。

6.3.1 S_{11} 、 S_{22} 模值

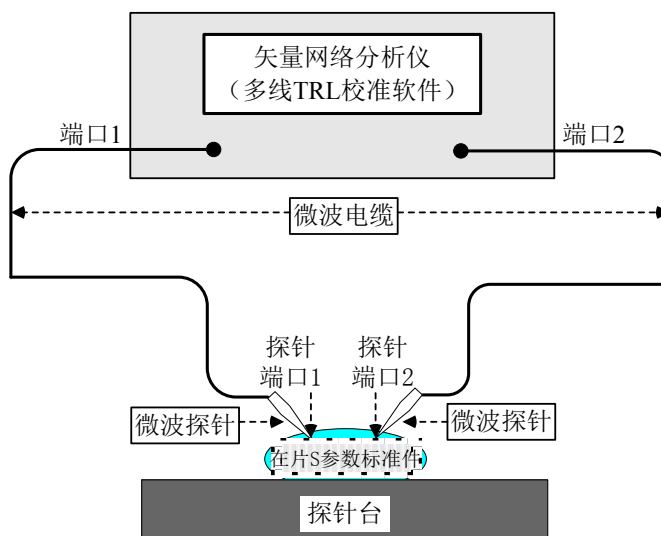


图3 网络分析仪在片测量系统校准在片标准件意图

- 设置测量参数为 S_{11} ，数据格式为线性幅度；
- 设置测量参数为 S_{22} ，数据格式为线性幅度；
- 按图3将在片S参数反射模值标准件置于网络分析仪在片测量系统探针端口1和探针端口2之间；
- 读取频率范围覆盖被校在片S参数反射模值标准件高、中、低频率的 S_{11} 和 S_{22} 模值，用式(1)计算示值误差，将数据填入附录A表格A.2中。

$$\Delta S_{ii} = S_{ii} - S_{ii_A} \quad (1)$$

式中：

ΔS_{ii} —— $S_{ii}(i=1,2)$ 模值示值误差；

S_{ii} ——被校标准件 $S_{ii}(i=1,2)$ 模值标称值；

S_{ii_A} ——被校标准件 $S_{ii}(i=1,2)$ 模值测量值。

6.3.2 S_{11} 、 S_{22} 相位

- 设置测量参数为 S_{11} ，数据格式为相位；
- 设置测量参数为 S_{22} ，数据格式为相位；
- 按图3将在片S参数反射相位标准件置于网络分析仪在片测量系统探针端口1和探针端口2之间；
- 读取频率范围覆盖被校在片S参数反射相位标准件高、中、低频率的 S_{11} 和 S_{22} 的相位，用式(2)计算示值误差，将数据填入附录A表格A.3中。

$$\Delta S_{ii}(p) = S_{ii}(p) - S_{ii_A}(p) \quad (2)$$

式中：

$\Delta S_{ii}(p)$ —— $S_{ii}(i=1,2)$ 相位示值误差；

$S_{ii}(p)$ ——被校标准件 $S_{ii}(i=1,2)$ 相位标称值；

$S_{ii_A}(p)$ ——被校标准件 $S_{ii}(i=1,2)$ 相位测量值。

6.3.3 S_{21} 、 S_{12} 模值

- 设置测量参数为 S_{21} ，数据格式为对数幅度；
- 设置测量参数为 S_{12} ，数据格式为对数幅度；
- 按图3将在片S参数传输模值标准件置于网络分析仪在片测量系统探针端口1和探针端口2之间；
- 读取频率范围覆盖被校在片S参数传输模值标准件高、中、低频率的 S_{21} 和 S_{12} 模值，用式(3)计算示值误差，将数据填入附录A表格A.4中。

$$\Delta S_{ij} = S_{ij} - S_{ij_A} \quad (3)$$

式中:

ΔS_{ij} —— $S_{ij}(i,j=1,2)$ 模值示值误差;

S_{ij} ——被校标准件 $S_{ij}(i,j=1,2)$ 模值标称值;

S_{ij_A} ——被校标准件 $S_{ij}(i,j=1,2)$ 模值测量值。

6.3.4 S_{21} 、 S_{12} 相位

- 设置测量参数为 S_{21} ，数据格式为相位;
- 设置测量参数为 S_{12} ，数据格式为相位;
- 按图 3 将在片 S 参数传输相位标准件置于网络分析仪在片测量系统探针端口 1 和探针端口 2 之间;
- 读取频率范围覆盖被校在片 S 参数传输相位标准件高、中、低频率的 S_{21} 和 S_{12} 的相位填入附录 A 表格 A.5 中。

$$\Delta S_{ij}(p) = S_{ij}(p) - S_{ij_A}(p) \quad (4)$$

式中:

$\Delta S_{ij}(p)$ —— $S_{ij}(i,j=1,2)$ 相位示值误差;

$S_{ij}(p)$ ——被校标准件 $S_{ij}(i,j=1,2)$ 相位标称值;

$S_{ij_A}(p)$ ——被校标准件 $S_{ij}(i,j=1,2)$ 相位测量值。

7 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:

- 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;
- 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;
- 校准所依据的技术规范的标识，包括名称及代号;
- 本次校准所用测量标准的溯源性及有效性说明;
- 校准环境的描述;
- 校准结果及其测量不确定度的说明;
- 对校准规范的偏离的说明;
- 校准证书签发人的签名、职务或等效标识;
- 校准结果仅对被校对象有效的说明;
- 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是由在片 S 参数标准件的使用情况、使用者、标准件本身质量等诸因素所决定的。建议复校时间间隔为 1 年，修理或调整后应进行校准。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 外观及工作正常性检查

表 A.1 外观及工作正常性检查

项目	检查结果
外观及工作正常性检查	

A.2 S_{11} 、 S_{22} 模值表 A.2 S_{11} 、 S_{22} 模值

频率/GHz	S_{11} 标称值	S_{11} 测量值	示值误差	测量不确定度 $U(k=2)$
频率/GHz	S_{22} 标称值	S_{22} 测量值	示值误差	测量不确定度 $U(k=2)$

A.3 S_{11} 、 S_{22} 相位表 A.3 S_{11} 、 S_{22} 相位

频率/GHz	S_{11} 标称值	S_{11} 测量值	示值误差	测量不确定度 $U(k=2)$
频率/GHz	S_{22} 标称值	S_{22} 测量值	示值误差	测量不确定度 $U(k=2)$

A.4 S_{21} 、 S_{12} 模值表 A.4 S_{21} 、 S_{12} 模值

频率/GHz	S_{21} 标称值	S_{21} 测量值	示值误差	测量不确定度 $U(k=2)$
频率/GHz	S_{12} 标称值	S_{12} 测量值	示值误差	测量不确定度 $U(k=2)$

A.5 S_{21} 、 S_{12} 相位表 A.5 S_{21} 、 S_{12} 相位

频率/GHz	S_{21} 标称值	S_{21} 测量值	示值误差	测量不确定度 $U(k=2)$
频率/GHz	S_{12} 标称值	S_{12} 测量值	示值误差	测量不确定度 $U(k=2)$

附录 B

校准证书内页格式

B.1 外观及工作正常性检查

表 B.1 外观及工作正常性检查

项目	检查结果
外观及工作正常性检查	

B.2 S_{11} 、 S_{22} 模值表 B.2 S_{11} 、 S_{22} 模值

频率/GHz	S_{11} 标称值	S_{11} 测量值	示值误差	测量不确定度 $U(k=2)$
频率/GHz	S_{22} 标称值	S_{22} 测量值	示值误差	测量不确定度 $U(k=2)$

B.3 S_{11} 、 S_{22} 相位表 B.3 S_{11} 、 S_{22} 相位

频率/GHz	S_{11} 标称值	S_{11} 测量值	示值误差	测量不确定度 $U(k=2)$
频率/GHz	S_{22} 标称值	S_{22} 测量值	示值误差	测量不确定度 $U(k=2)$

B.4 S_{21} 、 S_{12} 模值表 B.4 S_{21} 、 S_{12} 模值

频率/GHz	S_{21} 标称值	S_{21} 测量值	示值误差	测量不确定度 $U(k=2)$
频率/GHz	S_{12} 标称值	S_{12} 测量值	示值误差	测量不确定度 $U(k=2)$

B.5 S_{21} 、 S_{12} 相位表 B.5 S_{21} 、 S_{12} 相位

频率/GHz	S_{21} 标称值	S_{21} 测量值	示值误差	测量不确定度 $U(k=2)$
频率/GHz	S_{12} 标称值	S_{12} 测量值	示值误差	测量不确定度 $U(k=2)$

附录 C

测量不确定度评定示例

C.1 S_{11} 、 S_{22} 模值测量不确定度评定

C.1.1 测量模型

$$Y=X \quad (C.1)$$

式中：Y——被校在片反射模值标准件的 S_{11} 、 S_{22} 模值，线性值；

X——网络分析仪在片测量系统对在片反射模值标准件 S_{11} 、 S_{22} 模值的测量结果，线性值。

C.1.2 不确定度来源

根据测量模型，分析其测量不确定度来源为：

- 网络分析仪在片测量系统引入的不确定度；
- 测量重复性引入的不确定度。

C.1.3 测量不确定度分量的评定

C.1.3.1 网络分析仪在片测量系统引入的标准不确定度 u_1 ：

以 40GHz、 S_{11} 模值为 0.33 的在片反射模值标准件为例，计算得到网络分析仪在片测量系统引入的测量不确定度分量 $u_1=0.009$ 。

C.1.3.2 测量重复性引入的标准不确定度 u_2 ：

测量频率为 40GHz 时，在相同条件下，测量在片反射模值标准件 10 次，测量结果如表 C.1 所示。

表 C.1 40GHz 频点 S_{11} 模重复性数据

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值	0.367	0.366	0.372	0.369	0.368	0.364	0.370	0.371	0.368	0.365

测量重复性的实验标准偏差 $s(x)=0.003$ ，按照 A 类方法进行评定，测量重复性引入的不确定度分量 $u_2=0.003$ 。

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	评定类型	分布类型	k	不确定度分量
网络分析仪在片测量系统引入 u_1	B	正态	2	0.009
测量重复性引入 u_2	A	/	/	0.003

u_1 、 u_2 相互独立，互不相关，则合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 0.0095$$

C.1.5 扩展不确定度

取 $k=2$ ，则扩展不确定度：

$$U=ku_c=0.019$$

C.2 S_{11} 、 S_{22} 相位测量不确定度的评定

C.2.1 测量模型

$$Y=X \quad (C.2)$$

式中：Y——被校在片反射相位标准件的 S_{11} 、 S_{22} 相位，单位°；

X——网络分析仪在片测量系统对在片反射相位标准件 S_{11} 、 S_{22} 相位的测量结果，单位°。

C.2.2 不确定度来源

根据测量模型，分析其测量不确定度来源为：

- 网络分析仪在片测量系统引入的不确定度；
- 测量重复性引入的不确定度。

C.2.3 测量不确定度分量的评定

C.2.3.1 网络分析仪在片测量系统引入的标准不确定度 u_1 ：

以 10GHz、 S_{11} 相位为 75° 的在片反射相位标准件为例，计算得到网络分析仪在片测量系统引入的测量不确定度分量 $u_1=2.5^\circ$ 。

C.2.3.2 测量重复性引入的标准不确定度 u_2 ：

测量频率为 10GHz 时，在相同条件下，测量在片反射相位标准件 10 次，测量结果如表 C.3 所示。

表 C.3 10GHz 频点 S_{11} 相位重复性数据

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值 (°)	73.2	74.1	74.9	74.8	75.0	75.5	74.9	74.8	75.5	76.2

测量重复性的实验标准偏差 $s(x)=0.82^\circ$ ，按照 A 类方法进行评定，测量重复性引入的不确定度分量 $u_2=0.82^\circ$ 。

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	评定类型	分布类型	k	不确定度分量
网络分析仪在片测量系统引入 u_1	B	正态	2	2.5°
测量重复性引入 u_2	A	/	/	0.82°

u_1 、 u_2 相互独立，互不相关，则合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 2.7^\circ$$

C.2.5 扩展不确定度

取 $k=2$ ，则扩展不确定度：

$$U=ku_c=5.4^\circ$$

C.3 S_{21} 、 S_{12} 模值测量不确定度评定

C.3.1 测量模型

$$Y=X \quad (C.3)$$

式中: Y ——被校在片传输模值标准件的 S_{21} 、 S_{12} 模值, 单位 dB;

X ——网络分析仪在片测量系统对在片传输模值标准件 S_{21} 、 S_{12} 模值的测量结果, 单位 dB。

C.3.2 不确定度来源

根据测量模型, 分析其测量不确定度来源为:

- 网络分析仪在片测量系统引入的不确定度;
- 测量重复性引入的不确定度。

C.3.3 测量不确定度分量的评定

C.3.3.1 网络分析仪在片测量系统引入的标准不确定度 u_1 :

以 1GHz、 S_{21} 模值为 3dB 的在片标准件为例, 计算得到网络分析仪在片测量系统引入的测量不确定度分量 $u_1=0.035\text{dB}$ 。

C.3.3.2 测量重复性引入的标准不确定度 u_2 :

测量频率为 1GHz 时, 在相同条件下, 测量在片传输模值标准件 10 次, 测量结果如表 C.5 所示。

表 C.5 1GHz 频点 S_{21} 模重复性数据

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值 (dB)	3.26	3.27	3.28	3.27	3.28	3.27	3.28	3.26	3.27	3.25

测量重复性的实验标准偏差 $s(x)=0.010\text{dB}$, 按照 A 类方法进行评定, 测量重复性引入的不确定度分量 $u_2=0.010\text{dB}$ 。

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	评定类型	分布类型	k	不确定度分量
网络分析仪在片测量系统引入 u_1	B	正态	2	0.035dB
测量重复性引入 u_2	A	/	/	0.010dB

u_1 、 u_2 相互独立, 互不相关, 则合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 0.036\text{dB}$$

C.3.5 扩展不确定度

取 $k=2$, 则扩展不确定度:

$$U = ku_c = 0.07\text{dB}$$

C.4 S_{21} 、 S_{12} 相位测量不确定度的评定

C.4.1 测量模型

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

式中: Y ——被校在片传输相位标准件的 S_{21} 、 S_{12} 相位, 单位°;

X ——网络分析仪在片测量系统对在片传输相位标准件 S_{21} 、 S_{12} 相位的测量结果, 单位°。

C.4.2 不确定度来源

根据测量模型，分析其测量不确定度来源为：

- a) 网络分析仪在片测量系统引入的不确定度；
- b) 测量重复性引入的不确定度。

C.4.3 测量不确定度分量的评定

C.4.3.1 网络分析仪在片测量系统引入的标准不确定度 u_1 ：

以 40GHz 在片标准传输线为例，计算得到网络分析仪在片测量系统引入的测量不确定度分量 $u_1=0.80^\circ$ 。

C.4.3.2 测量重复性引入的标准不确定度 u_2 ：

测量频率为 40GHz 时，在相同条件下，测量在片准传输线 10 次，测量结果如表

C.7 所示。

表 C.7 40GHz 频点 S_{21} 相位重复性数据

次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值 ($^\circ$)	-27.26	-26.89	-26.63	-26.50	-26.37	-26.44	-27.12	-26.77	-26.38	-26.12

测量重复性的实验标准偏差 $s(x)=0.35^\circ$ ，按照 A 类方法进行评定，测量重复性引入的不确定度分量 $u_2=0.35^\circ$ 。

C.4.4 合成标准不确定度

表 C.8 标准不确定度汇总表

测量不确定度来源	评定类型	分布类型	k	不确定度分量
网络分析仪在片测量系统引入 u_1	B	正态	2	0.80°
测量重复性引入 u_2	A	/	/	0.35°

u_1 、 u_2 相互独立，互不相关，则合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2} = 0.88^\circ$$

C.4.5 扩展不确定度

取 $k=2$ ，则扩展不确定度：

$$U=k u_c=1.8^\circ$$