



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF XXXX-XXXX

微波变频器校准规范

Calibration Specification of Microwave Frequency Converters

(征求意见稿)

202X-XX-XX 发布

202X-XX-XX 实施

国家市场监督管理总局 发布

微波变频器校准规范
Calibration Specification of Microwave
Frequency Converters

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：北京东方计量测试研究所
中国计量科学研究院

参加起草单位：工业和信息化部电子第五研究所

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：

何梓滨（北京东方计量测试研究所）

宋淑娟（北京东方计量测试研究所）

张亦弛（中国计量科学研究院）

参加起草人：

王碧云（北京东方计量测试研究所）

田 飞（中国计量科学研究院）

段 誉（工业和信息化部电子第五研究所）

目录

目录.....	I
引言.....	II
1 范围	1
2 概述	1
3 计量特性	1
3.1 频率	1
3.2 带宽	1
3.3 杂散抑制	1
3.4 相位噪声	2
3.5 变频增益/衰减	2
3.6 1dB 压缩点输出功率.....	2
3.7 输出平坦度	2
3.8 三阶交调截取点输出功率	2
3.9 噪声系数	2
3.10 端口电压驻波比	2
3.11 群时延	2
4 校准条件	2
4.1 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	13
附录 A 原始记录内页格式	14
附录 B 校准证书内页格式	16
附录 C 不确定度评定示例.....	19

引言

JJF 1071-2010《国家计量校准规范编写规则》、JJF 1001-2011《通用计量术语及定义》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编制工作的基础性系列规范。

本规范为首次发布。

微波变频器校准规范

1. 范围

本规范适用于内置晶体振荡器和本地振荡器的仪器类微波变频器的校准。

2. 概述

微波变频器通常用于把输入的信号变频到所需要的目标频段，根据频率变换前后的情况可以分为下变频器和上变频器。

微波上变频器把输入的中频信号变换成射频信号。微波上变频器主要由中频级、混频器、本地振荡器和射频级组成，混频器后连接一个滤波器，以抑制在混频器输出端出现的本地振荡器信号和交调产物等杂散信号。微波下变频器把输入的射频信号变换成中频信号。微波下变频器主要由射频级、混频器、本地振荡器和中频级组成，混频器后通常连接一个滤波器，以抑制在混频器输出端出现的本地振荡器信号和和交调产物等杂散信号。

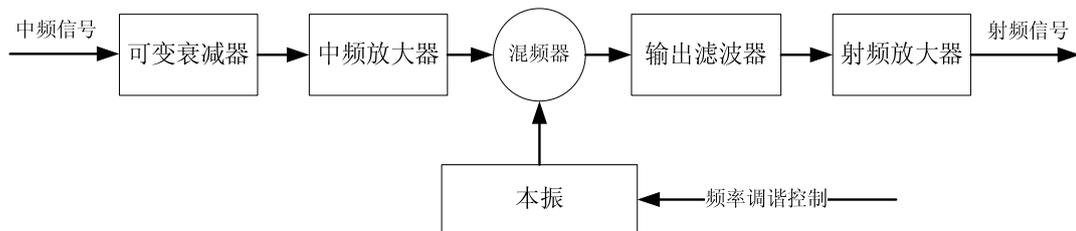


图1 上变频器工作原理示意图

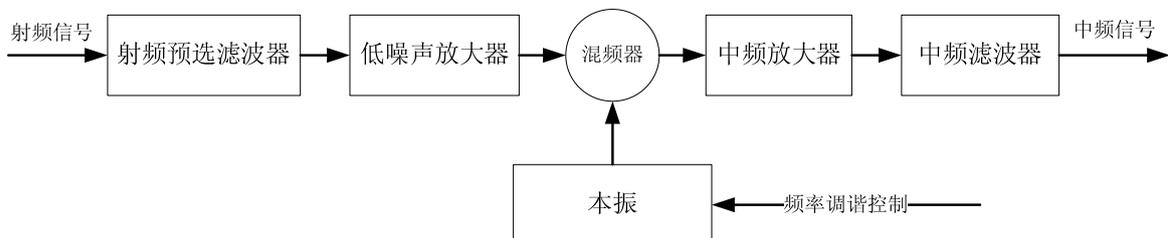


图2 下变频器工作原理示意图

3. 计量特性

3.1 频率

射频端口频率范围：2GHz~67GHz

中频端口频率范围：100kHz~15GHz

最大允许误差： $\pm 1 \times 10^{-7}$

3.2 带宽

$\leq 6\text{GHz}$

3.3 杂散抑制

$< -50\text{dBc}$

3.4 相位噪声

- ≤-50dBc/Hz@10Hz
- ≤-80dBc/Hz@1kHz
- ≤-100dBc/Hz@100kHz
- ≤-110dBc/Hz@1MHz

3.5 变频增益/衰减

- 50dB~50dB

3.6 1dB 压缩点输出功率

- 5dBm~30dBm

3.7 输出平坦度

- ≤3dB

3.8 三阶交调截取点输出功率

- 0dBm~20dBm

3.9 噪声系数

- 0dB~35dB

3.10 端口电压驻波比

- 1.05~1.8

3.11 群时延

- <10ns

4. 校准条件

4.1 环境条件

- a) 环境温度：(23±5)℃；
- b) 相对湿度：≤80%；
- c) 供电电源：(220±11)V，(50±1)Hz；
- d) 其它：周围无影响仪器正常工作的电磁干扰及机械振动。

4.2 校准用设备

4.2.1 信号发生器 1

- 频率范围：覆盖被校变频器的频率范围；
- 输出电平范围：覆盖被校变频器的输入功率范围；
- 相位噪声：优于被校变频器 6dB 以上。

4.2.2 信号发生器 2

- 频率范围：覆盖被校变频器的频率范围；
- 输出电平范围：覆盖被校变频器的输入功率范围。

4.2.3 频率计（频谱分析仪的频率计数功能）

- 频率范围：覆盖被校变频器的频率范围；
- 最大允许误差：优于被测变频器频率最大允许误差一个量级。

4.2.4 频谱分析仪

频率范围：覆盖被校变频器的频率范围；
电平测量动态范围： $\geq 100\text{dB}$ ；
相位噪声：优于被校变频器 6dB 以上；
平均噪声功率谱密度（使用增益法校准变频器噪声系数时）：
 $\leq -145\text{dBm/Hz}$ ($< 26.5\text{GHz}$),
 $\leq -130\text{dBm/Hz}$ ($\geq 26.5\text{GHz}$)。

4.2.5 噪声系数分析仪

频率范围：覆盖被校变频器的频率范围；
噪声系数测量范围： $0\text{dB} \sim 35\text{dB}$ ；
最大允许误差： $\pm 0.15\text{dB}$ ；
输入端电压驻波比： ≤ 1.5 。

4.2.6 矢量网络分析仪

具备嵌入式本振变频设备群时延测量功能；
频率范围：覆盖被校变频器的频率范围；
电压驻波比测量不确定度： $1\% \sim 5\%$ ($k=2$)；
传输幅度测量不确定度： $(0.1 \sim 1)\text{dB}$ ($k=2$)；
相位测量不确定度： $0.1^\circ \sim 3^\circ$ ($k=2$)。

4.2.7 功率计 1 及功率传感器 1

频率范围：覆盖被校变频器的频率范围；
功率测量范围： $(-70 \sim +30)\text{dBm}$ ；
功率测量准确度： $\pm 0.3\text{dB}$ 。

4.2.8 功率计 2 及功率传感器 2

频率范围：覆盖被校变频器的频率范围；
功率测量范围： $(-70 \sim +30)\text{dBm}$ ；
功率测量准确度： $\pm 0.3\text{dB}$ 。

4.2.9 外参考频率标准

相对频率偏差：优于被校变频器一个量级。

4.2.10 噪声源

频率范围：覆盖被校变频器的频率范围；
超噪比范围： $-5.4\text{dB} \sim 35\text{dB}$ ；
输出端电压驻波比： ≤ 1.3 。

4.2.11 参考混频器

频率范围：覆盖被校变频器的频率范围；
变频损耗： $\leq 10\text{dB}$ ；
电压驻波比： ≤ 1.5 ；
输入输出和本振间的频率关系应与被校变频器一致。

4.2.12 校准混频器

频率范围：覆盖被校变频器的频率范围；

传输幅度和相位具有互易性。

4.2.13 功分器

频率范围：覆盖被校变频器的频率范围；

对称性：优于 $\pm 0.4\text{dB}$ 。

4.2.14 合路器

频率范围：覆盖三阶交调校准项目相关频率范围；

平衡度：优于 $\pm 0.5\text{dB}$ 。

4.2.15 负载

频率范围：覆盖被校变频器的频率范围；

电压驻波比： < 1.4 ；

阻抗： $50\ \Omega$ 。

5. 校准项目和校准方法

5.1 校准项目

校准项目见表 1 所示。

表 1 校准项目表

序号	项目名称	条款
1	频率	5.2.2
2	带宽	5.2.3
3	杂散抑制	5.2.4
4	相位噪声	5.2.5
5	变频增益/衰减	5.2.6
6	1dB 压缩点输出功率	5.2.7
7	输出平坦度	5.2.8
8	三阶交调截取点输出功率	5.2.9
9	噪声系数	5.2.10
10	端口电压驻波比	5.2.11
11	群时延	5.2.12

5.2 校准方法

5.2.1 外观及工作正常性检查

被校变频器的外观应完好，各开关、按键等调节正常，不应有影响电气性能的机械损伤。被校变频器应有说明书、及配套附件。

被校变频器按技术说明书规定时间预热，预热后应显示正常，如被校变频器具有自校准功能，按要求对仪器进行自校准。

检查被校变频器的 10MHz 参考功能，用外部参考频标连接被校变频器的外参考输入，被校变频器应正常显示外参考锁定。

5.2.2 频率

a)按图3连接仪器。

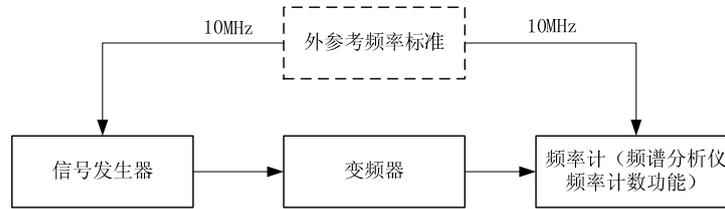


图3 频率校准连接示意图

b)设置变频器的输入和输出频率为技术指标规定的输入和输出的中心频率。

c)设置信号发生器输出频率为变频器的输入频率范围的中心频率为 f_{in} ，在变频器标称带宽范围内按 Δf 改变信号发生器的输出频率 $f_{in} \pm \Delta f$ ，选取不少于9个频率值，应覆盖标称带宽内最低频率、最高频率和中心频率，使用频率计读出对应的变频器输出频率值 f_{out} ，记录在表A.2中。

5.2.3 带宽

a)按图3连接仪器。

b)设置变频器的输入和输出频率为技术指标规定的输入和输出中心频率。

c)设置信号发生器输出频率为变频器的输入频率范围的中心频率为 f_{in} ，读取频率计读数对应的变频器的输出频率为 f_{out} 。

d)改变信号发生器的输出频率为标称带宽内的最高频率，使用频率计读出对应的变频器输出频率值 f_{out_max} 。

e)改变信号发生器的输出频率为标称带宽内的最低频率，使用频率计读出对应的变频器输出频率值 f_{out_min} 。

按照公式（1）计算带宽，记录在表A.3中；

$$BW=f_{out_max}-f_{out_min} \dots\dots\dots (1)$$

式中：

BW ——带宽，Hz；

f_{out_max} ——在本设置下变频器的最大输出频率，Hz；

f_{out_min} ——在本设置下变频器的最小输出频率，Hz。

5.2.4 杂散抑制

a)按图4连接仪器。



图4 杂散抑制校准连接示意图

b) 设置变频器的输入和输出频率为技术指标规定的输入和输出中心频率。

c) 按技术说明书要求设置变频器增益值或衰减值, 无要求时增益设置为最大值, 衰减设置为最小值。

d) 设置信号发生器的输出频率为变频器的输入频率范围的中心频率, 按技术说明书要求的变频器输出功率设置信号发生器输出功率。

e) 设置频谱分析仪的中心频率为变频器的输出频率, 合理设置频谱分析仪的参考电平, 跨度为变频器带宽的3倍或技术说明书规定的相关范围, 合理设置分辨带宽使得能清晰分辨较大的杂散信号, 在频谱仪上读取基波幅度值 A_0 和最大杂散幅度值 A_i , 按照公式(2)计算杂散抑制, 记录在表A.4中;

$$\lambda = A_i - A_0 \dots \dots \dots (2)$$

式中:

λ ——变频器杂散抑制, dB;

A_i ——最大杂散幅度值, dBm;

A_0 ——基波幅度值, dBm。

5.2.5 相位噪声

a) 按图4连接仪器。

b) 设置变频器的输入和输出频率为技术指标规定的输入和输出中心频率, 信号发生器和频谱分析仪设置对应频率。

c) 按技术说明书要求设置信号发生器输出功率, 无要求时设置为额定输入功率。

d) 按技术说明书要求设置变频器增益值或衰减值, 无要求时增益设置为最大值, 衰减设置为最小值。

e) 根据所测载波偏置位置, 设置频谱分析仪的参考电平、中心频率、跨度、分辨带宽等参数, 使被测载波信号在屏幕中心或最左侧, 应注意充分利用频谱分析仪的动态范围。

f) 测量载波功率 P_c 。

g) 测量载波偏置 Δf 处的边带功率 P_m 。

h) 按照公式(3)计算归一化到1Hz带宽的边带功率;

$$P_{SSB} = P_m - 10 \lg B_n + C \dots \dots \dots (3)$$

式中:

P_{SSB} ——归一化到1Hz带宽的边带功率, dBm;

P_m ——频谱分析仪观测的边带功率, dBm;

B_n ——频谱分析仪分辨带宽, Hz;

C ——频谱分析仪测量随机噪声的修正值(数字频谱分析仪一般为0dB, 模拟频谱分析仪一般为2.5dB), dB。

i) 按照公式(4)计算单边带相位噪声, 记录在表A.5中;

$$L = P_{SSB} - P_c \dots \dots \dots (4)$$

e) 从功率计1上读出变频器的输入功率 P_i ，从功率计2上读出变频器的输出功率 P_0 ，按照公式（5）计算此时变频器的初始变频增益 G_0 。

f) 逐步增加信号源的输出功率，每次均计算当时的变频增益 G_i ，直到 G_0 与 G_i 刚好相差1dB，记录此时功率计1的读数 P_i ，功率计2的读数 P_s ，按照公式（6）计算被校变频器1dB压缩点输出功率 P_{1dB} ，记录在表A.8中；

$$P_{1dB}=P_s \dots\dots\dots (6)$$

式中：

P_{1dB} ——1dB 压缩点输出功率， dBm；

P_s ——发生 1dB 增益压缩时变频器的输出功率， dBm。

5.2.8 输出平坦度

a) 按图6连接仪器。



图 6 输出平坦度校准连接示意图

b) 设置变频器的输入和输出频率为技术指标规定的输入和输出中心频率，按技术说明书要求设置变频器增益值或衰减值，无要求时增益设置为最大值，衰减设置为最小值。

c) 信号发生器设置对应频率，合理设置信号发生器输出功率，使得变频器输出功率比技术说明书中要求的1dB压缩点输出功率低5dB~10dB。

d) 功率计频率设置与变频器输出频率保持一致。

e) 从功率计上读出变频器的输出功率 P 。

f) 在带宽范围内改变信号发生器输出频率，选取不少于9个频率值，应覆盖带宽内最低频率和最高频率，同步改变功率计频率设置，记录被校变频器带宽范围内的最大输出功率 P_{max} 和最小输出功率 P_{min} ，按照公式（7）计算平坦度，记录在表A.7中；

$$\Delta=P_{max}-P_{min}\dots\dots\dots (7)$$

式中：

Δ ——输出平坦度， dB；

P_{max} ——带宽范围内最大输出功率， dBm；

P_{min} ——带宽范围内最小输出功率， dBm；

5.2.9 三阶交调截取点输出功率

a) 按图7连接仪器。

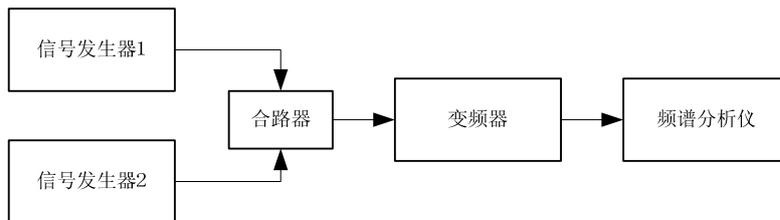


图 7 三阶交调截取点输出功率校准连接示意图

b) 设置变频器的输入和输出频率为技术指标规定的输入和输出中心频率，按技术说明书要求设置变频器增益值或衰减值，无要求时增益设置为最大值，衰减设置为最小值。

c) 设置信号发生器1的频率为对应频率 f_{in} ，信号发生器2的频率为 $f_{in}+\Delta$ （ Δ 为变频器技术说明书的规定值），输出功率相等且为变频器技术说明书中的规定值。

d) 设置频谱分析仪的参考电平、中心频率、跨度、分辨带宽等参数，使得在频谱分析仪上可同时观测到两个输出峰值信号和两个三阶交调信号。

e) 关闭信号发生器2的输出功率，使用频谱分析仪观测信号发生器1的输出功率为 P_1 ，关闭信号发生器1的输出功率，打开信号发生器2的输出功率并进行微调，直到频谱分析仪的观测值 P_2 与 P_1 相等，打开信号发生器1的输出功率。

f) 在频谱分析仪上测量峰值信号幅度 P_0 和三阶交调信号的幅度 P_{s3} （取幅度较大者），按照公式（10）计算被校变频器三阶交调截取点输出功率，记录在表A.9中；

$$OIP3 = P_0 + (P_0 - P_{s3}) / 2 \dots \dots \dots (8)$$

式中：

$OIP3$ ——三阶交调截取点输出功率，dBm；

P_0 ——输出峰值信号幅度，dBm；

P_{s3} ——三阶交调信号幅度，dBm。

5.2.10 噪声系数

5.2.10.1 Y 系数法

a) 在噪声系数分析仪上设置变频器测量模式，设置射频和中频的工作频率范围。

b) 将噪声源连接到噪声系数分析仪上，在噪声系数分析仪按校准键完成自校准。

c) 按图8将变频器接入系统，设置变频器的输入和输出频率为技术指标规定的输入和输出中心频率设置变频器的输入频率和输出频率。



图 8 Y 系数法噪声系数校准连接示意图

d) 执行测量，并将结果记录在表A.10中。

5.2.10.2 增益法

a) 按图9连接仪器。

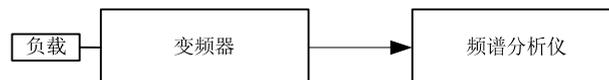


图 9 增益法噪声系数校准连接示意图

b) 设置变频器的输入和输出频率为技术指标规定的输入和输出中心频率。

c) 设置变频器增益为最大值，衰减为最小值，用5.2.6校准方法获取变频器变频增益 G 。

d) 设置频谱分析仪中心频率与变频器输出频率一致，跨度为1kHz或以下，分辨带宽尽可能小，视频带宽设置为分辨带宽的3倍，降低频谱分析仪的参考电平，使得噪声信

号显示在屏幕中部位置，设置频谱分析仪射频衰减为0dB，打开频谱分析仪信号轨迹平均功能，设置平均次数为20或以上。

- e) 频谱分析仪完成平均扫描后，在中心频率处测量噪声功率 P 。
- f) 按照公式（11）计算噪声系数，记录在表A.10中；

$$N = P - 10 \lg B_n + 174 - G \dots \dots \dots (9)$$

式中：

- N ——变频器噪声系数，dB；
- P ——变频器输出噪声功率，dBm；
- B_n ——频谱分析仪分辨带宽，Hz；
- G ——变频器变频增益，dB。

注：增益法建议被测变频器噪声系数较高或增益较高时使用。

5.2.11 端口电压驻波比

- a) 矢量网络分析仪设置适当的中频带宽（通常为100Hz），根据所测端口的工作频率范围设置矢量网络分析仪的扫频范围和扫频点数，输出功率设置为变频器的额定输入功率。
- b) 设置矢量网络分析仪测量参数为散射参数S11，显示格式为电压驻波比，对矢量网络分析仪进行单端口校准。
- c) 如图10所示，将变频器的输入端口接于矢量网络分析仪的校准端口上，另一端口接50欧姆匹配负载。

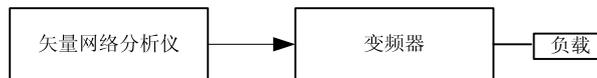


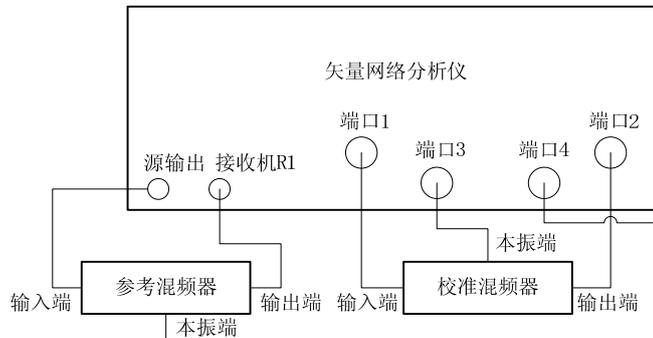
图 10 端口电压驻波比校准连接示意图

- d) 使用频标读取扫描频段内测量结果的最大值，并将结果记录在表A.11中。
- e) 将变频器的输出端口接于矢量网络分析仪的校准端口上，另一端口接50欧姆匹配负载，重复步骤d)。

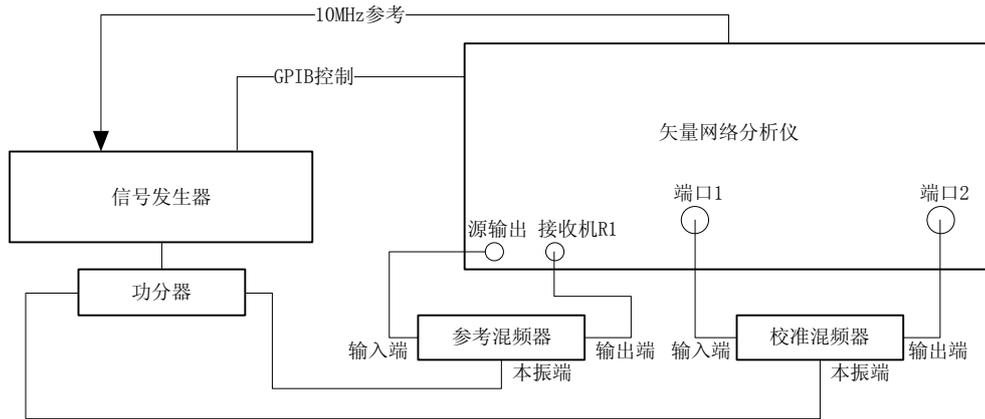
5.2.12 群时延

方法一：

- a) 按图11将参考混频器接入矢量网络分析仪的源输出到接收机R1输入之间，暂不接入校准混频器；当使用双源四端口网络分析仪时，参考图a)；当使用两端口网络分析仪时，参考图b)，此时需保证外接信号源可被矢量网络分析仪控制；



a) 使用双源四端口网络分析仪



b) 使用两端口网络分析仪

图 11 群时延校准连接示意图

b) 设置矢量网络分析仪测量类型为矢量混频器测量。

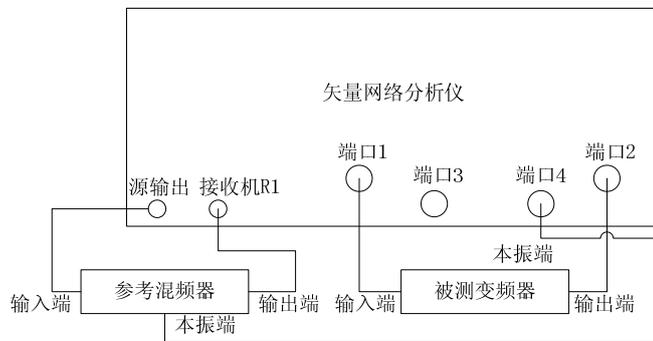
c) 根据被测变频器的输入频率、输出频率和本振频率设置矢量网络分析仪的频率参数，根据被测变频器的输入功率范围设置矢量网络分析仪的功率参数。

d) 设置矢量网络分析仪中频带宽为适当值（通常为1kHz）。

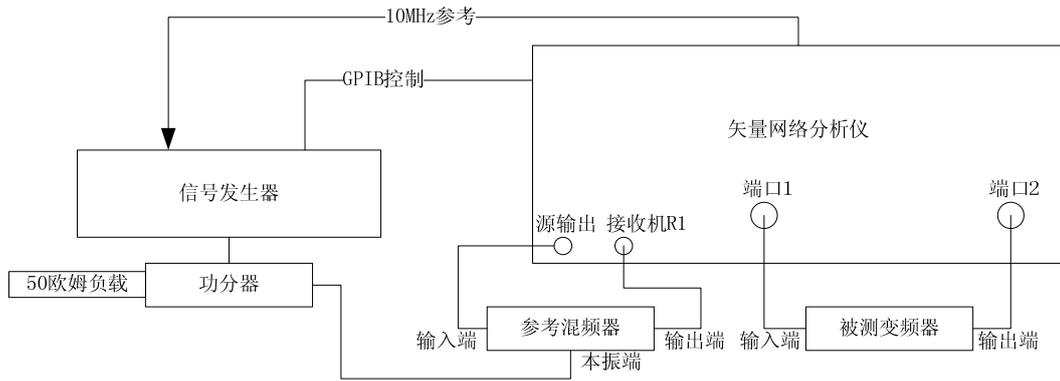
e) 选择被测变频器将要连接的矢量网络分析仪端口，执行全两端口校准。

g) 打开矢量网络分析仪的变频测量模块，执行校准混频器校准。

h) 如图12所示，将被测变频器接入矢量网络分析仪的端口1到端口2之间，参考混频器保持前述连接状态不变；当使用双源四端口网络分析仪时，参考图a)；当使用两端口网络分析仪时，参考图b)，此时需保证外接信号源可被矢量网络分析仪控制。



a) 使用双源四端口矢量网络分析仪



b) 使用两端口矢量网络分析仪

图 12 群时延测量连接示意图

- i) 设置被测变频器的输入频率、输出频率和增益/衰减值。
- j) 设置矢量网络分析仪相位参考点为中心频率点，根据校准要求设置频率孔径，执行被测变频器的群时延测量。
- k) 在矢量网络分析仪中读取群时延测量结果，将结果记录在表A.12中。

方法二：

- a) 当使用具备相参功能的四源矢量网络分析仪时，无需接入参考混频器，按照图13)接入校准混频器，测试校准混频器的群时延。

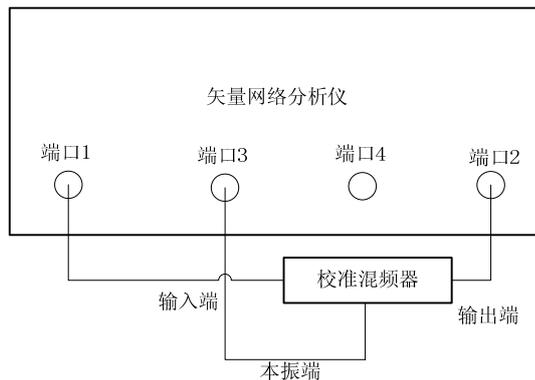


图13 使用具备相参功能的四源矢量网络分析仪

- b) 按方法一 b)~g)步骤执行。
- c) 如图14所示，将被测变频器接入矢量网络分析仪的端口1到端口2之间。

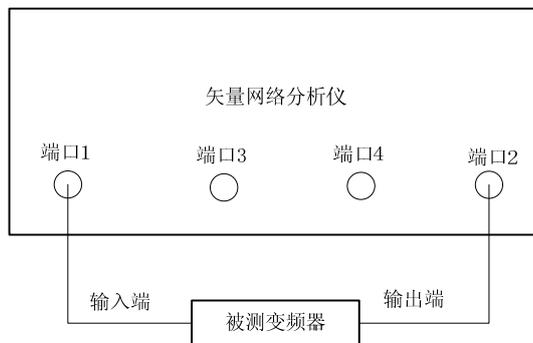


图 14 使用具备相参功能的四源矢量网络分析仪

- d) 设置被测变频器的输入频率、输出频率和增益/衰减值。

e) 设置矢量网络分析仪相位参考点为中心频率点，根据校准要求设置频率孔径，执行被测变频器的群时延测量。

f) 在矢量网络分析仪中读取群时延测量结果，将结果记录在表A.12中。

6. 校准结果表达

变频器校准后，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。

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 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 频率

变频器频率设置值	输入频率设置值	输出频率实测值	$U(k=2)$
中心频率 (按技术指标要求选点)	带宽内最小频率		
		
	输入频率范围的中心频率		
		
	带宽内最大频率		

表 A.3 带宽

最高频率实测值	最低频率实测值	带宽实测值	$U(k=2)$

表 A.4 杂散抑制

基波幅度	杂散幅度	杂散抑制	$U(k=2)$

表 A.5 相位噪声

载波频率	载波偏置	相位噪声	$U(k=2)$

表 A.6 变频增益/衰减

增益或衰减设置	输入功率	输出功率	变频增益或变频衰减	$U(k=2)$
设置 1				
设置 2				
设置 3				
.....				

表 A. 7 输出平坦度

输入频率	输入功率	输出功率	平坦度/dB	$U(k=2)$
带宽内最小频率				
.....				
输入频率范围的中心频率				
.....				
带宽内最大频率				

表 A. 8 1dB 压缩点输出功率

输入频率	输出频率	1dB 压缩点输入功率	1dB 压缩点输出功率	$U(k=2)$

表 A. 9 三阶交调截取点输出功率

输入频率	输出频率	峰值信号幅度	三阶交调信号幅度	三阶交调截取点输出功率	$U(k=2)$

表 A. 10 噪声系数

输出频率	噪声系数	$U(k=2)$

表 A. 11 端口电压驻波比

端口	扫频范围	电压驻波比	$U(k=2)$
输入端口			
输出端口			

表 A. 12 群时延

输出频率	群时延	$U(k=2)$

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 频率

变频器频率设置值	输入频率设置值	输出频率实测值	$U(k=2)$
中心频率 (按技术指标要求选点)	带宽内最小频率		
		
	输入频率范围的中心频率		
		
	带宽内最大频率		

表 B.3 带宽

最高频率实测值	最低频率实测值	带宽实测值	$U(k=2)$

表 B.4 杂散抑制

基波幅度	杂散幅度	杂散抑制	$U(k=2)$

表 B.5 相位噪声

载波频率	载波偏置	相位噪声	$U(k=2)$

表 B.6 变频增益/衰减

增益或衰减设置	输入功率	输出功率	变频增益或变频衰减	$U(k=2)$
设置 1				
设置 2				
设置 3				
.....				

表 B.7 输出平坦度

输入频率	输入功率	输出功率	平坦度/dB	$U(k=2)$
带宽内最小频率				
.....				
输入频率范围的中心频率				
.....				
带宽内最大频率				

表 B.8 1dB 压缩点输出功率

输入频率	输出频率	1dB 压缩点输出功率	$U(k=2)$

表 B.9 三阶交调截取点输出功率

输入频率	输出频率	三阶交调截取点输出功率	$U(k=2)$

表 B.10 噪声系数

输出频率	噪声系数	$U(k=2)$

表 B.11 端口电压驻波比

端口	扫频范围	电压驻波比	$U(k=2)$
输入端口			
输出端口			

表 B.12 群时延

输出频率	群时延	$U(k=2)$

附录 C 不确定度评定示例

C.1 频率

C.1.1 测量方法

用频率计直接读取变频器输出频率的测量值。

C.1.2 不确定度来源

- a) 频率计晶振准确度引入的不确定度 u_1 ;
- b) 频率计测量频率分辨力引入的不确定度 u_2 ;
- c) 频率计测量频率的测量重复性引入不确定度 u_3 。

C.1.3 标准不确定度评定（使用内参考）

- a) 频率计晶振准确度引入的不确定度

频率计为 Keysight 53230A（带高稳晶振选件），其晶振相对频率偏差为 5×10^{-9} ，按均匀分布取 $k = \sqrt{3}$ ，引入的标准不确定度分量为 $u_{1\text{rel}} = 5 \times 10^{-9} / \sqrt{3} = 2.9 \times 10^{-9}$ 。

- b) 频率计测量频率分辨力引入的不确定度

频率计测量 70MHz 频率时的分辨力为 1×10^{-7} MHz，按均匀分布取 $k = \sqrt{3}$ ，引入的标准不确定度分量为 $u_{2\text{rel}} = 1 \times 10^{-7} / \sqrt{3} / 70 = 8.3 \times 10^{-10}$ 。

- c) 频率计测量频率的测量重复性引入不确定度

按 A 类方法评定测量重复性引入的不确定度。频率计测量微波变频器输出的 70MHz 信号 10 次，测量结果如表 1.1 所示。10 次测量的频率平均值为 69.9999924MHz，按贝塞尔公式计算单次测量结果标准偏差为 2.47×10^{-9} ，则测量重复性引入的不确定度为 2.47×10^{-9} 。

表 C.1.1 频率计测量 70MHz 频率数据

测量次数	1	2	3	4	5
测量值(MHz)	69.9999922	69.9999923	69.9999928	69.9999926	69.9999924
测量次数	6	7	8	9	10
测量值(MHz)	69.9999926	69.9999925	69.9999927	69.9999924	69.9999924

C.1.4 合成标准不确定度

各不确定度分量汇总见表 1.2。

表 1.2 频率准确度（使用内参考）的不确定度分量一览表

符号	来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度分量
u_1	参考频率标准晶振准确度引入的不确定度	B	均匀	$\sqrt{3}$	2.9×10^{-9}
u_2	频率计测量频率分辨力引入的不确定度	B	均匀	$\sqrt{3}$	8.3×10^{-10}

u_3	频率计测量频率的测量重复性引入不确定度	A	—	—	2.47×10^{-9}
-------	---------------------	---	---	---	-----------------------

以上各标准不确定度分量不相关，则合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 3.9 \times 10^{-9}$$

C.1.6 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为 $U=k \cdot u_c=7.8 \times 10^{-9}$ 。

C.2 相位噪声

C.2.1 测量模型

时间间隔测量模型如式 (4.1) 所示。

$$P_{SSB} = P_m - 10 \lg B_n + C \quad (C.2.1)$$

式中：

P_{SSB} ——归一化到 1Hz 带宽的边带功率，dBm；

P_m ——频谱分析仪观测的边带功率，dBm；

B_n ——频谱分析仪分辨带宽，Hz；

C ——频谱分析仪测量随机噪声的修正值（数字频谱分析仪一般为 0dB，模拟频谱分析仪一般为 2.5dB），dB。

C.2.2 不确定度来源

- 频谱分析仪测量电平不准引入的不确定度 u_1 ；
- 频谱分析仪测量分辨力引入的不确定度 u_2 ；
- 失配引入的不确定度 u_3 ；
- 频谱分析仪自身相位噪声引入的不确定度 u_4 ；
- 测量重复性引入不确定度 u_5 ；

C.2.3 标准不确定度评定

- 频谱分析仪电平测量误差引入的不确定度

测量接收机 FSMR 频谱分析仪模式下，70MHz 电平测量误差为 $\pm 0.3\text{dB}$ ，按均匀分布取 $k=\sqrt{3}$ ，引入的标准不确定度分量 $u_1=0.3/\sqrt{3}=0.17\text{dB}$ ；

- 频谱分析仪电平测量分辨力引入的不确定度

测量接收机 FSMR 频谱分析仪模式下，70MHz 电平分辨力为 0.001dB，按均匀分布取 $k=\sqrt{3}$ ，引入的标准不确定度分量 $u_2=0.001/\sqrt{3}=0.00058\text{dB}$ ；

- 失配引入的不确定度；

失配引入的不确定度与被校微波变频器的输出端电压驻波比、测试线缆电压驻波比有

关，按公式 $|\Gamma| = \frac{s-1}{s+1}$ ，计算被校准微波变频器、测试线缆的反射系数。失配为反正弦分布，包含因子 $k=\sqrt{2}$ ，然后根据 (C.2.2) 式计算被校准微波变频器和频谱分析仪 FSMR（连接测试线缆）失配引入的不确定度：

$$u_3 = 20 \lg[1 + |\Gamma_g| |\Gamma_L|] / \sqrt{2} \quad (\text{C.2.2})$$

式中：

$|\Gamma_g|$ ----被校微波变频器输出端的反射系数；

$|\Gamma_L|$ ----频谱分析仪 FSMR（连接测试线缆）的反射系数。

频率	被校准微波变频器		FSMR（连接测试线缆）		u_3 (dB)
	电压驻波比 S_g	反射系数 Γ_g	电压驻波比 S_L	反射系数 Γ_L	
70MHz	1.17	0.08	1.08	0.04	0.0185

d) 频谱分析仪自身相位噪声引入的不确定度；

频谱分析仪在 70MHz，频偏 10kHz 是在相位噪声指标为 -128dBc/Hz，由于被测微波变频器的相位噪声指标，因此，频谱分析仪自身相位噪声引入的不确定度可忽略不计。

d) 相位噪声测量重复性引入不确定度

按 A 类方法评定测量重复性引入的不确定度。频谱分析仪测量微波变频器相位噪声 10 次（载波 70MHz，频偏 10kHz），平均值为 -88.8dBc/Hz，按贝塞尔公式计算单次测量结果标准偏差为 0.99dB，则测量重复性引入的不确定度为 $u_4=0.99\text{dB}$ 。

表 C2.1 频谱分析仪测量变频器的相位噪声数据

测量次数	1	2	3	4	5
测量值(dBc/Hz)	-89.9dBc/Hz	-88.5dBc/Hz	-90.0dBc/Hz	-87.5dBc/Hz	-89.3dBc/Hz
测量次数	6	7	8	9	10
测量值(dBc/Hz)	-89.5dBc/Hz	-88.3dBc/Hz	-88.5dBc/Hz	-89.8dBc/Hz	-87.3dBc/Hz

C.2.4 合成标准不确定度

各标准不确定度分量汇总见表 C.2.2。

表 C.2.2 微波变频器相位噪声的不确定度分量一览表

符号	来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度分量
u_1	频谱分析仪电平测量误差引入的不确定度	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.17dB
u_2	频谱分析仪电平测量分辨力引入的不确定度	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.00058dB
u_3	失配引入的不确定度	B	反正弦	$\sqrt{2}$	0.0185dB
u_4	相位噪声测量重复性引入不确定度	—	—	—	忽略不计
u_5	相位噪声测量重复性引入不确定度	A	—	—	0.99dB

以上各标准不确定度分量不相关，则合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2} = 1.01\text{dB}$$

C.2.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为 $U=k \cdot u_c=2.1\text{dB}$ 。

C.3 变频增益/衰减

C.3.1 测量模型

$$G=P_0-P_i, \quad A=P_i-P_0 \quad (\text{C.3.1})$$

式中：

G ——变频器的变频增益，dB；

P_0 ——变频器的输出功率，dBm；

P_i ——变频器的输入功率，dBm；

A ——变频器的变频衰减，dB。

C.3.2 不确定度来源

- 功率传感器 1 校准因子引入的不确定度 u_1 ；
- 功分器输出口 1 与功率传感器 1 失配引入的不确定度 u_2 ；
- 功率传感器 2 校准因子引入的不确定度 u_3 ；
- 功分器输出口 2 与功率传感器 2 失配引入的不确定度 u_4 ；
- 功率计 1 分辨力引入的不确定度 u_5 ；
- 功率计 2 分辨力引入的不确定度 u_6 ；
- 增益/衰减测量重复性引入不确定度 u_7 ；

C.3.3 标准不确定度评定

- 功率传感器 1 测量不准引入的不确定度

功率传感器 1 NRP-Z21 功率测量不确定度为 0.072dB ($k=2$)，则引入的不确定度分量 $u_1=0.072/2=0.036\text{dB}$

- 功分器输出口 1 与功率传感器 1 失配引入的不确定度；

按公式 $|\Gamma| = \frac{s-1}{s+1}$ 。计算功分器输出口 1 与功率传感器 1 的反射系数，失配为反正弦分布，包含因子 $k = \sqrt{2}$ ，然后根据 (3.2) 式计算功分器输出口 1 与功率传感器 1 失配引入的不确定度：

频率	功分器输出口 1		功率传感器 1		u_2 (dB)
	电压驻波比 S	反射系数	电压驻波比	反射系数	
2.2GHz	1.63	0.24	1.07	0.03	0.0496

- 功率传感器 2 测量不准引入的不确定度；

功率传感器 2 为 NRP-Z21，因此：

$$u_3=u_1=0.036\text{dB}$$

d) 功分器输出口 2 与功率传感器 2 失配引入的不确定度 u_4 ;

u_4 计算方法与 u_3 相同:

频率	功分器输出口 2		功率传感器 2		u_4 (dB)
	电压驻波比 S	反射系数	电压驻波比	反射系数	
70MHz	1.61	0.23	1.04	0.02	0.0281

e) 功率计 1 分辨力引入的不确定度 u_5 ;

功率计 NRP2 分辨力为 0.001dB, 按均匀分布取 $k=\sqrt{3}$, 引入的标准不确定度分量 $u_5=0.001/\sqrt{3}=0.00058\text{dB}$ 。

f) 功率计 2 分辨力引入的不确定度 u_6 ;

功率计 NRP2 分辨力为 0.001dB, 按均匀分布取 $k=\sqrt{3}$, 引入的标准不确定度分量 $u_6=0.001/\sqrt{3}=0.00058\text{dB}$ 。

g) 增益/衰减测量重复性引入不确定度 u_7 ;

按 A 类方法评定测量重复性引入的不确定度。按贝塞尔公式计算单次测量结果标准偏差, 则测量重复性引入的不确定度见表 C.3.1。

表 C.3.1 变频器增益/衰减测试数据

测量次数	增益/衰减测试值				
	1.00dB	5.00dB	10.00dB	15.00dB	20.00dB
1	1.46dB	5.55dB	10.29dB	14.95dB	19.36dB
2	1.46dB	5.54dB	10.28dB	14.95dB	19.36dB
3	1.47dB	5.55dB	10.29dB	14.93dB	19.36dB
4	1.46dB	5.55dB	10.28dB	14.94dB	19.34dB
5	1.47dB	5.53dB	10.27dB	14.93dB	19.36dB
6	1.47dB	5.54dB	10.28dB	14.95dB	19.34dB
7	1.47dB	5.55dB	10.28dB	14.93dB	19.35dB
8	1.47dB	5.54dB	10.28dB	14.95dB	19.34dB
9	1.47dB	5.53dB	10.27dB	14.93dB	19.36dB
10	1.47dB	5.55dB	10.27dB	14.95dB	19.35dB
u_7	0.01dB	0.01dB	0.01dB	0.01dB	0.01dB

C.3.4 合成标准不确定度

各标准不确定度分量汇总见表 C.3.2。

表 C.3.2 微波变频器增益/衰减的不确定度分量一览表

符号	来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度分量
u_1	功率传感器 1 测量不准引入的不确定度	B	/	2	0.036dB
u_2	功分器输出口 1 与功率传感器 1 失配引入的不确定度	B	反正弦	$\sqrt{2}$	0.0496dB

u_3	功率传感器 2 测量不准引入的不确定度；	B	/	2	0.036dB
u_4	功分器输出口 2 与功率传感器 2 失配引入的不确定度	B	反正弦	$\sqrt{2}$	0.0281dB
u_5	功率计 1 分辨力引入的不确定度	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.00058dB
u_6	功率计 2 分辨力引入的不确定度	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.00058dB
u_7	增益/衰减测量重复性引入不确定度	A	——	——	0.01dB

以上各标准不确定度分量不相关，则合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2} = 0.08\text{dB}$$

C.3.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为 $U=k \cdot u_c=0.16\text{dB}$ 。

C.41dB 压缩点输出功率

C.4.1 测量模型

$$P_{1\text{dB}}=P_s \quad (\text{C.4.1})$$

式中：

式中：

$P_{1\text{dB}}$ ——1dB 压缩点输出功率，dBm；

P_s ——发生 1dB 增益压缩时变频器的输出功率，dBm。

C.4.2 不确定度来源

- 功率传感器 1 校准因子引入的不确定度 u_1 ；
- 功分器输出口 1 与功率传感器 1 失配引入的不确定度 u_2 ；
- 功率传感器 2 校准因子引入的不确定度 u_3 ；
- 功分器输出口 2 与功率传感器 2 失配引入的不确定度 u_4 ；
- 功率计 1 分辨力引入的不确定度 u_5 ；
- 功率计 2 分辨力引入的不确定度 u_6 ；
- 信号步进引入的不确定度 u_7 ；
- 1dB 增益压缩测量重复性引入不确定度 u_8 ；

C.4.3 标准不确定度评定

a) $u_1 \sim u_6$ 计算方法详见 3.3a) ~f) 步骤。

g) 信号步进引入的不确定度

信号步进为 0.1dB，按正态分布 $k=2$ ，信号步进引入的不确定度为 0.05dB；

$$u_7=0.05\text{dB}$$

h) 测量重复性引入不确定度 u_8 ;

按 A 类方法评定测量重复性引入的不确定度。按贝塞尔公式计算单次测量结果标准偏差为 0.011dB，则测量重复性引入的不确定度 0.011dB。

表 C.4.11dB 增益压缩测试数据

测量次数	1	2	3	4	5
测量值(dBm)	14.96	14.96	14.96	14.95	14.96
测量次数	6	7	8	9	10
测量值(dBm)	14.95	14.96	14.95	14.94	14.96

C.4.4 合成标准不确定度

各标准不确定度分量汇总见表 C.4.2。

表 C.4.2 微波变频器 1dB 增益压缩的不确定度分量一览表

符号	来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度分量
u_1	功率传感器 1 测量不准引入的不确定度	B	/	2	0.036dB
u_2	功分器输出口 1 与功率传感器 1 失配引入的不确定度	B	反正弦	$\sqrt{2}$	0.0496dB
u_3	功率传感器 2 测量不准引入的不确定度;	B	/	2	0.036dB
u_4	功分器输出口 2 与功率传感器 2 失配引入的不确定度	B	反正弦	$\sqrt{2}$	0.0281dB
u_5	功率计 1 分辨力引入的不确定度	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.00058dB
u_6	功率计 2 分辨力引入的不确定度	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.00058dB
u_7	信号步进引入的不确定度	B	正态	2	0.05dB
u_8	1dB 增益压缩测量重复性引入不确定度	A	——	——	0.01dB

以上各标准不确定度分量不相关，则合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2 + u_6^2 + u_7^2 + u_8^2} = 0.10\text{dB}$$

C.4.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为 $U=ku_c=0.21\text{dB}$ 。

C.5 噪声系数

C.5.1 测量模型

将噪声系数仪作为第二级进行测量；噪声源接到噪声系数仪输入端，测量它们的噪声系数的同时，设定功率参考点。将被测接到噪声源和噪声系数仪之间进行测量；通过 Y 系数测量法得到噪声系数；被测为第一级，噪声系数仪作为第二级，经测量得到总的噪声系数和第一级的增益、第二级的噪声系数，计算得到第一级的噪声系数。按照式(C.9.1)可以得出被测噪声系数的测量结果。

$$F_1 = F_{12} - \frac{F_2 - 1}{G_1} \tag{C.5.1}$$

$$NF_x = ENR - 10 \lg(Y - 1)$$

式中：

NF_x ——测量结果，dB；

ENR——标准噪声源的超噪比，dB；

Y——由噪声系数仪测量到 Y 系数，线性值。

C.5.2 不确定度来源

- a) 噪声源超噪比引入的不确定度 u_1 ；
- b) 噪声系数分析仪测量不准引入的不确定度 u_2 ；
- c) 噪声源与被测之间的失配引入的不确定度 u_3 ；
- d) 第二级噪声贡献引入的不确定度 u_4 ；
- e) 噪声系数测量重复性引入不确定度 u_5 ；

C.5.3 标准不确定度评定

a) 噪声源超噪比引入的不确定度

标准噪声源超噪比引入的不确定度由 B 类评定，由上级计量证书可知噪声源超噪比的扩展不确定度为 0.2dB，其值服从正态分布其包含因子 $k=2$ 。因此， $u_1=0.2\text{dB}/2=0.1\text{dB}$ 。

b) 噪声系数分析仪测量不准引入的不确定度 u_2 ；

噪声系数仪测量噪声系数技术指标为 $\pm 0.10\text{dB}$ ，服从正态分布 $k=2$ ， $u_2=0.10\text{dB}/2=0.05\text{dB}$ 。

c) 噪声源与被测之间的失配引入的不确定度

失配引入的不确定度与被校微波变频器的输入端电压驻波比、噪声源端口电压驻波比

有关，按公式 $|\Gamma| = \frac{s-1}{s+1}$ ，计算被微波变频器的输入端、噪声源端口的反射系数。失配为反正弦分布，包含因子 $k = \sqrt{2}$ ，然后根据第 2 节 (C.2.2) 式计算被校准微波变频器和噪声源失配引入的不确定度：

被校准微波变频器		噪声源		u_3 (dB)
电压驻波比	反射系数	电压驻波比	反射系数	
1.55	0.22	1.15	0.07	0.0919

d) 第二级噪声贡献引入的不确定度

将二级噪声贡献公式偏微分： $\Delta F_1 = \frac{F_2}{F_1} \Delta F_{12dB} - \frac{F_2}{F_1 G_1} \Delta F_{2dB} + \frac{F_2 - 1}{F_1 G_1} \Delta G_{1dB}$

混频器的噪声与插入损耗之间有: $F_1 \approx L_1 = \frac{1}{S_1}$;

因此: $GF_1 = 1, F_2 = 1.58$;

$$-\frac{F_2}{F_1 G_1} \Delta F_{2dB} + \frac{F_2-1}{F_1 G_1} \Delta G_{1dB} = \frac{1.58}{1} \times 0.1 + \frac{1.58-1}{1} \times 0.1 = 0.058dB; \text{按均匀分布 } k=\sqrt{3},$$

$$u_4 = 0.058dB / \sqrt{3} = 0.0335dB$$

e) 噪声系数测量重复性引入不确定度 u_5 ;

按 A 类方法评定测量重复性引入的不确定度。噪声系数分析仪测量微波变频器噪声系数 10 次, 平均值为 9.67dB, 按贝塞尔公式计算单次测量结果标准偏差为 0.09dB, 则测量重复性引入的不确定度为 $u_5 = 0.09dB$ 。

表 C.5.1 微波变频器的噪声系数测量数据

测量次数	1	2	3	4	5
测量值(dB)	9.62	9.55	9.71	9.81	9.73
测量次数	6	7	8	9	10
测量值(dB)	9.71	9.77	9.61	9.74	9.54

C.9.4 合成标准不确定度

各标准不确定度分量汇总见表 C.5.2。

表 C.5.2 微波变频器噪声系数的不确定度分量一览表

符号	来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度分量
u_1	噪声源超噪比引入的不确定度	B	正态	2	0.1dB
u_2	噪声系数分析仪测量不准引入的不确定度	B	正态	2	0.05dB
u_3	噪声源与被测之间的失配引入的不确定度	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.0919dB
u_4	第二级噪声贡献引入的不确定度	B	反正弦	$\sqrt{2}$	0.0335dB
u_5	噪声系数测量重复性引入不确定度	A	—	—	0.09dB

以上各标准不确定度分量不相关, 则合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2} = 0.197dB$$

C.5.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$, 扩展不确定度为 $U=k \cdot u_c = 0.39dB$ 。

C.6 端口电压驻波比

C.6.1 测量模型

$$S=S_0 \quad (\text{C.6.1})$$

式中：

S ——电压驻波比；

S_0 ——网络分析仪电压驻波比测量值。

C.6.2 不确定度来源

- a) 网络分析仪测量电压驻波比不准引入的不确定度 u_1 ；
- b) 网络分析仪剩余系统误差误差引入的不确定度 u_2 ；
- c) 电压驻波比测量重复性引入不确定度 u_3 ；

C.6.3 标准不确定度评定

- a) 网络分析仪测量驻波比不准引入的不确定度

网络分析仪电压驻波比上级计量证书量传的不确定度为 3.0%，包含因子 $k=2$ ，

$$u_1 = \frac{U}{k} = \frac{3.0\%}{2} = 1.5\%。$$

- b) 网络分析仪剩余系统误差误差引入的不确定度

网络分析仪剩余系统误差是指经自校准矢量误差修正之后，由于校准件性能局限性和误差修正模型不完善导致未能修正的那部分系统误差。剩余系统误差可由网络分析仪经单端口校准后的方向性、源匹配和反射跟踪三项指标计算得出，计算公式见式 (C.10.2)。

$$\Delta G = \pm(E_D + G^2 E_S + G(1 - E_{RT})) \quad (\text{C.6.2})$$

式中：

E_D --- 方向性，量纲为 1 的量，线性表示；

E_S --- 源匹配，量纲为 1 的量，线性表示；

E_{RT} --- 反射跟踪，量纲为 1 的量，线性表示；

G --- 被测功率传感器反射系数，量纲为 1 的量；

ΔG --- 剩余系统误差，量纲为 1 的量，线性表示。

表 6.1 网络分析仪使用 3.5mm 校准件 OSL 校准后各项指标

频段	方向性	源匹配	反射跟踪
300kHz~500MHz	42dB	37dB	±0.003dB
500MHz~2GHz	42dB	37dB	±0.003dB
2GHz~6GHz	38dB	31dB	±0.004dB

表 6.1 各项指标换算为线性表示然后代入式 (6.2)，得到 OSL 校准剩余系统误差。剩余系统误差就误差性质而言是反射系数的绝对误差，其与相应电压驻波比的相对误差可由式 (C.6.3) 换算，式中 S 为被测微波变频器电压驻波比。

$$\Delta S = \pm \frac{1 + \frac{S-1}{S+1} + \Delta G}{1 - \frac{S-1}{S+1} - \Delta G} \times 100\% \quad (\text{C.6.3})$$

经计算, $u_2=0.9\%$ 。

c) 电压驻波比测量重复性引入不确定度 u_3 ;

按 A 类方法评定测量重复性引入的不确定度。网络分析仪测量微波变频器电压驻波比 10 次, 按贝塞尔公式计算单次测量结果标准偏差为 0.2%, 则测量重复性引入的不确定度为 $u_3=0.2\%$ 。

表 C.6.2 微波变频器的电压驻波比测量数据

测量次数	1	2	3	4	5
测量值	1.54	1.55	1.55	1.54	1.56
测量次数	6	7	8	9	10
测量值	1.56	1.55	1.54	1.56	1.56

C.6.4 合成标准不确定度

各标准不确定度分量汇总见表 C.6.3。

表 C.6.3 微波变频器电压驻波比的不确定度分量一览表

符号	来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度分量
u_1	网络分析仪测量驻波比不准引入的不确定度	B		2	1.5%
u_2	网络分析仪剩余系统误差误差引入的不确定度	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.9%
u_3	电压驻波比测量重复性引入不确定度	A	——	——	0.2%

以上各标准不确定度分量不相关, 则合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 1.89\%$$

C.6.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$, 扩展不确定度为 $U=k \cdot u_c=3.6\%$ 。

C.7 群时延

群时延由下式计算所得:

$$\tau = -\frac{\Delta\phi}{360^\circ \Delta f} \quad (\text{C.7.1})$$

式中 $\Delta\phi$ ——为相位响应

Δf ——为频率， Δf 称之为延迟孔径，群时延 t 值是相对于延迟孔径 Δf 而言的。

在矢量网络分析仪上通常以频率跨度的百分数来设置延迟孔径，该百分数也叫做平滑百分数。孔径设置越小，测量越真实。孔径设置越大，测得的群时延波动值越小。加大孔径可以使噪声的影响变小，但要牺牲频率分辨率。孔径的设置通常由测试人员视测量精度要求而定。

C.7.1 测量模型

$$\tau = \tau_0 \quad (\text{C.7.2})$$

式中：

τ ——群时延；

τ_0 ——网络分析仪群时延测量值。

C.7.2 不确定度来源

- 网络分析仪校准后相位测量不准引入的不确定度 u_1 ；
- 网络分析仪迹线噪声引入的不确定度 u_2 ；
- 电压驻波比测量重复性引入不确定度 u_3 ；

C.7.3 标准不确定度评定

- 网络分析仪校准后相位测量不准的不确定度

网络分析仪相位测量引入的不确定为 0.7° ，用 B 类评定，按均匀分布， $k = \sqrt{3}$ ，变频器 D492， $\Delta f = 2\text{MHz}$ ，根据式 (C.7.1)：

$$u_1 = \frac{0.7^\circ}{\sqrt{3} \times 360^\circ \times 4 \times 10^6} = 0.4\text{ns}$$

- 网络分析仪迹线噪声引入的不确定度

网络分析仪的系统相位扫迹噪声 $\pm 0.01^\circ$ ，按均匀分布规律，取 k 为 $\sqrt{3}$ ，代入式 (C.7.1)，得到由系统相位扫迹噪声带来的测量不确定度分量为：

$$u_1 = \frac{0.01^\circ}{\sqrt{3} \times 360^\circ \times 2 \times 10^6} = 0.04\text{ns}$$

- 群时延测量重复性引入不确定度 u_3 ；

按 A 类方法评定测量重复性引入的不确定度。网络分析仪测量微波变频器群时延 10 次，按贝塞尔公式计算单次测量结果标准偏差为 0.03ns，则测量重复性引入的不确定度为 $u_3 = 0.03\text{ns}$ 。

表 C.7.1 微波变频器的群时延测量数据

测量次数	1	2	3	4	5
测量值/ns	1.97	1.94	1.98	2.02	1.91
测量次数	6	7	8	9	10
测量值/ns	1.92	2.00	1.95	2.01	1.93

C.7.4 合成标准不确定度

各标准不确定度分量汇总见表 C.7.2。

表 C.7.2 微波变频器群时延的不确定度分量一览表

符号	来源	评定方法	分布	k 值	标准不确定度分量
u_1	网络分析仪测量相位不准引入的不确定度	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.4ns
u_2	网络分析仪迹线噪声引入的不确定度	B	均匀	$\sqrt{3}$	0.04ns
u_3	群时延测量重复性引入不确定度	A	——	——	0.03ns

以上各标准不确定度分量不相关，则合成标准不确定度为

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} = 0.4\text{ns}$$

C.7.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为 $U=k \cdot u_c=0.8\text{ns}$ 。

以下空白