



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 1128—2004

矢量信号分析仪校准规范

Calibration Specification for Vector Signal Analyzers

2004 - 09 - 21 发布

2004 - 12 - 21 实施

国家质量监督检验检疫总局 发布

矢量信号分析仪校准规范

Calibration Specification for
Vector Signal Analyzers

JJF 1128—2004

本规范经国家质量监督检验检疫总局于 2004 年 09 月 21 日批准，并自 2004 年 12 月 21 日起施行。

归口单位：全国无线电计量技术委员会

起草单位：信息产业部电子 601 计量站

本规范由归口单位负责解释

本规范主要起草人：

谢少锋 （信息产业部电子 601 计量站）

梁琼崇 （信息产业部电子 601 计量站）

参加起草人：

杨桥新 （信息产业部电子 601 计量站）

目 录

1 范围	(1)
2 引用文献	(1)
3 术语和定义	(1)
3.1 互调失真	(1)
3.2 矢量坐标图	(1)
3.3 误差矢量	(1)
3.4 误差矢量幅度	(1)
3.5 矢量幅度误差	(1)
3.6 相位误差	(2)
3.7 I/Q 原点偏移	(2)
3.8 频率偏移	(2)
4 概述	(2)
5 计量特性	(2)
6 校准条件	(3)
6.1 环境条件	(3)
6.2 校准用标准器及其他设备	(4)
6.3 其他要求	(5)
7 校准项目和校准方法	(5)
7.1 工作正常性检查	(5)
7.2 矢量信号测量功能的检查	(6)
7.3 I/Q 信号测量功能的检查	(6)
7.4 频率测量示值的校准	(6)
7.5 载波幅度测量示值的校准	(7)
7.6 载波幅度测量非线性的校准	(8)
7.7 双通道测量不一致性的校准	(9)
7.8 输入通道互调失真的校准	(10)
7.9 输入通道谐波失真的校准	(10)
7.10 输入通道内部噪声的校准	(11)
7.11 源到通道串扰的校准	(11)
7.12 通道间串扰的校准	(12)
7.13 输入口回波损耗的校准	(12)
7.14 源输出口回波损耗的校准	(13)
7.15 信号源输出幅度的校准	(13)
7.16 信号源谐波失真的校准	(13)
7.17 测量通道相位噪声的校准	(14)

7.18 数字量测量示值的校准	(14)
8 校准结果的表达	(15)
9 复校时间间隔	(16)
附录 A 矢量信号分析仪校准记录格式	(17)
附录 B 主要项目校准不确定度分析实例	(26)

矢量信号分析仪校准规范

1 范围

本规范适用于各型矢量信号分析仪的校准，也适用于数字通信综合测试仪接收机部分的校准。

2 引用文献

“Measuring Waveform Quality, Code-Domain Power, Time Offset and Phase Offset of CDMA Signal”, IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Brussels, Belgium, June 4-6, 1996。

“Operation Manual of Model 89441 A Vector Signal Generator”, 1997。

《计量测试技术手册》，第8卷 电子学，中国计量出版社，1997。

3 术语和定义

3.1 互调失真 (intermodulation distortion): 当两个频率分量以上的合成信号通过非线性网络后，在其输出信号中除了原有各频率分量及其相应的各谐波分量外，还会产生各频率分量的诸次和、差频分量，这种因相互调制产生组合频率成分而引起的失真，称为互调失真。

3.2 矢量坐标图 (vector diagram): 在坐标平面 (I/Q 平面) 上用相应的点表示经数字调制后的矢量信号的瞬时值称之为坐标图 (或状态图)，如图 1。一个平面代表一个状态，每点代表一个矢量。不同矢量代表逻辑量“0”或“1”。由于 RF 放大器的非线性与噪声，传输通道的干扰与衰落等，使得矢量的幅度与相位产生变化，因此测量到的矢量与参考矢量并不一样，如图 2 所示。

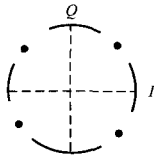


图 1 矢量坐标图

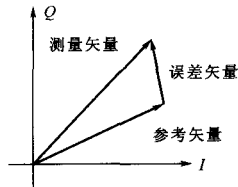


图 2 误差矢量图

3.3 误差矢量 (error vector): 等于测量到的矢量与参考矢量的矢量差。

3.4 误差矢量幅度 (error vector magnitude, EVM): 等于误差矢量的幅度。通常表示为对参考矢量峰值的百分比。

3.5 矢量幅度误差 (vector magnitude error): 等于测量到的矢量的幅度与参考矢量的幅度之差。通常表示为对参考矢量峰值的百分比。

3.6 相位误差 (phase error): 等于测量到的矢量相角与参考矢量相角之差。

3.7 I/Q 原点偏移 (I/Q origin offset): 等于测量到的 I/Q 的原点与参考 I/Q 的原点之差。通常表示为对参考矢量峰值比的对数的二十倍, 即分贝单位。

3.8 频率偏移 (frequency error): 等于测量到的矢量的瞬时频率与参考矢量的瞬时频率之差。

测量以上参数时, 矢量信号分析仪把测得的每个矢量与参考信号的对应矢量逐一比较, 求出差值。参考信号由分析仪根据被测信号码型自动产生, 是个统计量。测量结果显示的是多次测量结果的平均值。

4 概述

矢量信号分析仪主要由以下几部分组成: 量程控制, ADC, I/Q 分离及滤波, 取样存储, 数字解调, ……等。其中“数字解调”和“ I/Q 分离滤波”是矢量信号分析仪有别于模拟分析仪的主要部分。现时的通信制式及调制方式很多, 常见数字通讯制式有: CDMA, NADC, GSM 等。此外还有数字视频, 数字音频广播制式等。常见的调制方式有: BPSK、QPSK、8PSK、16QAM、256QAM, 9PRS、25PRS、49PRS, 81PRS 等。

矢量信号分析仪是用来测量矢量信号, 特别指数字调制信号的各种参数的。主要应用于数字移动通信、卫星通信、数字音视频、无线 LAN 及局域多点分配服务 (LMDS) 等产品的初始设计、仿真及最后的硬件样机的设计与调试等。矢量信号分析仪使用不同的解调器对不同制式信号进行分析。有些矢量信号分析仪还自带有数字调制信号源。

除了数字解调功能外, 常见的矢量信号分析仪在功能和使用方法上与频谱分析仪有很多相同之处, 校准方法可以相互参考。

5 计量特性

表 1 列出被校矢量信号分析仪的计量特性。

表 1 计量特性

序号	项目	测量范围	允许误差限 ^[注1]
1	频率测量	1Hz ~ 4GHz	$\pm 1.0 \times 10^{-7}$
2	载波幅度测量	(+20 ~ -110) dBm	± 1.0 dB
3	载波幅度测量非线性	(0 ~ -80) dBm	± 0.25 dB
		(-80 ~ -110) dBm	± 0.35 dB
4	双通道测量不一致性	(+10 ~ -30) dBm	幅度: ± 0.15 dB 相位: $\pm 2^\circ$
5	输入通道互调失真	双音三阶互调, ≤ 1 MHz	≤ -75 dBc
		双音三阶互调, > 1 MHz	≤ -78 dBc
6	输入通道谐波失真		≤ -75 dBc

表 1 (续)

序号	项目	测量范围	允许误差限 ^(注1)
7	输入通道内部噪声	(1 ~ 40) kHz	$\leq -131\text{dBm/Hz}$
		(0.04 ~ 10) MHz	$\leq -144\text{dBm/Hz}$
		(10 ~ 1000) MHz	$\leq -160\text{dBm/Hz}$
		(1000 ~ 4000) MHz	$\leq -160\text{dBm/Hz}$
8	串扰	输入电平: 20dBm	$\leq -135\text{dBc}$
9	输入回波损耗	输入阻抗 50Ω	$\leq -25\text{dB}$
10	源输出口回波损耗	输入阻抗 50Ω	$\leq -20\text{dB}$
11	信号源输出幅度	(20 ~ -110) dBm	$\pm 1\text{dB}$
12	信号源谐波失真		$\leq -40\text{dB}$
13	测量通道相位噪声	偏移频率: 100Hz	$\leq -87\text{dBc/Hz}$
		偏移频率: 1kHz	$\leq -107\text{dBc/Hz}$
		偏移频率: 10kHz	$\leq -120\text{dBc/Hz}$
		偏移频率: 100kHz	$\leq -117\text{dBc/Hz}$
14	误差矢量幅度测量	频率跨度: $\leq 100\text{kHz}$	$\leq 0.5\% \text{RMS}$
		频率跨度: $\leq 1\text{MHz}$	$\leq 1.0\% \text{RMS}$
		频率跨度: $> 1\text{MHz}$	$\leq 2.0\% \text{RMS}$
15	矢量幅度误差测量	频率跨度: $\leq 100\text{kHz}$	$\leq 0.5\% \text{RMS}$
		频率跨度: $\leq 1\text{MHz}$	$\leq 1.0\% \text{RMS}$
		频率跨度: $> 1\text{MHz}$	$\leq 2.0\% \text{RMS}$
16	相位误差测量	频率跨度: $\leq 100\text{kHz}$	$\leq 0.3^\circ \text{RMS}$
		频率跨度: $\leq 1\text{MHz}$	$\leq 0.5^\circ \text{RMS}$
		频率跨度: $> 1\text{MHz}$	$\leq 1.0^\circ \text{RMS}$
17	I/Q 原点偏移测量		$\leq -55\text{dB RMS}$
18	频率偏移测量		$\leq 10\text{Hz RMS}$

6 校准条件

6.1 环境条件

- a) 环境温度: $(23 \pm 5)^\circ\text{C}$;
- b) 相对湿度: $< 80\%$;
- c) 大气压强: $(86 \sim 106) \text{kPa}$;
- d) 供电电压: $(220 \pm 22) \text{V}$, $(50 \pm 1) \text{Hz}$;

e) 其他：周围应无影响标准和被校准仪器正常工作的机械振动和电磁干扰。

6.2 校准用标准器及其他设备

校准用标准器见表 2，校准用其他设备见表 3。

表 2 校准用标准器

序号	标准设备名称	性能指标	测量范围	极限误差 ^[注1]
1	高稳晶体振荡器	输出频率	10MHz	$\pm 1 \times 10^{-9}$
2	测量接收机	频率测量	0.15MHz ~ 4GHz	$\pm 1 \times 10^{-6}$
		电平测量	(+20 ~ -110) dBm	$\pm (0.2 \sim 0.5)$ dB
3	矢量信号分析仪	频率测量	1Hz ~ 4GHz	$\pm 1 \times 10^{-6}$
		电平测量	(+20 ~ -110) dBm	$\pm (0.5 \sim 1.0)$ dB
		误差矢量幅度测量	频率跨度： ≤ 100 kHz	$\leq 0.3\%$ RMS
			频率跨度： ≤ 1 MHz	$\leq 0.5\%$ RMS
			频率跨度： > 1 MHz	$\leq 1.0\%$ RMS
		矢量幅度误差测量	频率跨度： ≤ 100 kHz	$\leq 0.3\%$ RMS
			频率跨度： ≤ 1 MHz	$\leq 0.5\%$ RMS
			频率跨度： > 1 MHz	$\leq 1.0\%$ RMS
		相位误差测量	频率跨度： ≤ 100 kHz	$\leq 0.17^\circ$ RMS
			频率跨度： ≤ 1 MHz	$\leq 0.34^\circ$ RMS
频率跨度： > 1 MHz	$\leq 0.57^\circ$ RMS			
I/Q 原点偏移测量		≤ -60 dB RMS		
频率偏移测量		≤ 1 Hz RMS		
4	数字信号发生器	输出频率	10kHz ~ 4GHz	$\pm 1 \times 10^{-6}$
		输出电平	(+20 ~ -110) dBm	± 1 dB; 分辨力：0.01dB
		数字调制		能产生稳定的数字调制信号
		I/Q 信号		有稳定的 I/Q 信号输出
		谐波失真		≤ -30 dBc
		非谐波失真		≤ -70 dBc
		外时基输入	10MHz	

表 2 (续)

序号	标准设备名称	性能指标	测量范围	极限误差 ^[注1]
5	合成信号发生器	输出频率	10Hz ~ 10MHz	$\pm 1 \times 10^{-6}$
		输出电平	(+20 ~ -30) dBm	± 1 dB; 分辨力: 0.01dB
		谐波失真		≤ -30 dBc
		非谐波失真		≤ -70 dBc
		外时基输入	10MHz	
6	低通滤波器	截止频率	大于基波, 小于谐波	
		带外抑制		≥ 50 dB
7	矢量网络分析仪	测试频率	(0.3 ~ 4000) MHz	
		有效方向性		≥ 50 dB
8	频谱分析仪	频率	(0.01 ~ 4000) MHz	$\pm 1 \times 10^{-6}$ (内时基)
		电平	(+20 ~ -90) dBm	$\pm (1 \sim 3)$ dB
		谐波失真	10Hz ~ 10MHz	≤ -46 dBc
		外时基输入	10MHz	
9	功率分配器	频率	DC ~ 100MHz	
		不对称性		≤ 0.2 dB

表 3 校准用其他设备

序号	设备名称	性能指标	测量范围	极限误差 ^[注1]
1	低通滤波器	截止频率	大于基波, 小于谐波	
		带外抑制		≥ 50 dB
2	功率分配器	频率	DC ~ 100MHz	
		不对称性		≤ 0.2 dB

[注1] 由于校准不判定合格与否, 被校仪器的允许误差和标准器的极限误差仅供参考。

6.3 其他要求

仪器送校时应附有全部附件和使用说明书。复校时还应附上次的校准证书;
被校仪器应能正常工作(如: 开机自检通过);
被校仪器有明晰的型号, 产品编号等惟一性标识。

7 校准项目和校准方法

7.1 工作正常性检查

7.1.1 外观检查

被校仪器应结构完整，无影响工作的机械损伤。各开关、旋钮和按键等应灵活可靠。

7.1.2 正常性检查

接通电源，被校矢量信号分析仪自动开始自检。自检通过后，正常工作应显示初始状态或上次关机前所设状态。如未能通过自检，应记录被校仪器显示的错误信息，并尽快关机，分析原因。

7.2 矢量信号测量功能的检查

7.2.1 仪器连接如图 3 所示。

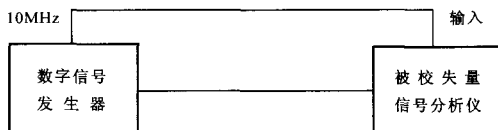


图 3 矢量信号测量功能的检查

7.2.2 置数字信号发生器的输出频率为 935MHz（或其他频率），电平为 0dBm，信号格式为 CDMA（GSM，NADC 或其他格式）。

7.2.3 置被校矢量信号分析仪为射频数字信号解调状态，通信制式和中心频率与数字信号发生器相同，频率跨度不限。置触发为“随机”，“内部源”，“第一通道”，“延时 1ms”。

7.2.4 当被校矢量信号分析仪被设置为不同的显示方式时，显示的图形应与说明书指明的图形相同。可能的显示方式如下：

星座图（Polar IQ Constellation）；

眼图（Eye Diagram）。

7.3 I/Q 信号测量功能的检查

7.3.1 仪器连接如图 4 所示。

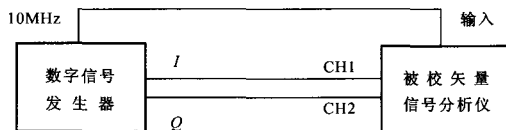


图 4 I/Q 信号测量功能的检查

7.3.2 置数字信号发生器为 I/Q 信号输出状态。

7.3.3 置被校矢量信号分析仪为 I/Q 信号测量模式，两个通道选择相同的参数设置。

7.3.4 按说明书指引操作被校矢量信号分析仪，显示合适的图形（如眼图和星座图）或数字作为检查对象，以确认是否与预期的图形或数字相符。

7.4 频率测量示值的校准^[注2]

7.4.1 仪器连接如图 5 所示。

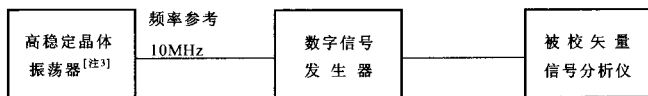


图 5 频率测量示值的校准

7.4.2 置数字信号发生器输出电平为 0dBm, 按附录 A 表 A.4 “标准频率值”一栏设置输出频率 f_0 。

7.4.3 置被校仪器为频率测量状态, 分辨率按指标要求设置。如果指标未标明, 应置于尽可能高的分辨率的状态。

7.4.4 在读被校仪器上, 用适当的方法 (例如, 计数器功能, 或频标峰值寻找功能), 获得频率读数 f , 记于表 A.4。

7.4.5 按式 (1) 计算频率测量示值相对误差 δ 。

$$\delta = \frac{(f - f_0)}{f_0} \quad (1)$$

[注 2] 带有内部时基输出的被校矢量信号分析仪, 可按 JJG180—2002 《电子测量仪器内石英晶体振荡器检定规程》校准其内部时基。

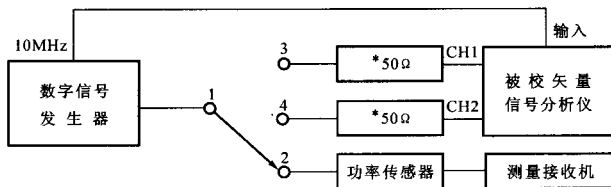
[注 3] 如果数字信号发生器的输出频率的允许误差限比被校仪器的频率允许误差限低一个数量级及以上时, 可以不使用高稳定晶体振荡器。

7.5 载波幅度测量示值的校准^[注4]

7.5.1 仪器连接如图 6 所示。

7.5.2 将 1 与 3 相连。置数字信号发生器为纯载波状态, 并按附录 A 表 A.5 “频率”和“信号电平”各栏的要求设置其载波频率和输出电平。

7.5.3 置被校仪器为幅度测量状态, 并按附录 A 表 A.5 “输入阻抗”、“频率”和“量程”各栏的要求设置其输入阻抗、中心频率和量程。选用适当方式 (如频标的峰值寻找功能) 读出信号电平值, 即为幅度测量示值 P 。



* 校准输入阻抗为 1MΩ 的通道时, 接上 50Ω 通过式负载。

图 6 载波幅度测量示值的校准

7.5.4 将 1 与 2 相连。不改变数字信号发生器的状态, 适当操作测量接收机^[注5], 以测

量数字信号发生器的载波电平，即为幅度测量标准值 P_0 ，记于表 A.5 中。

7.5.5 按式 (2) 计算幅度测量示值相对误差 δ 。

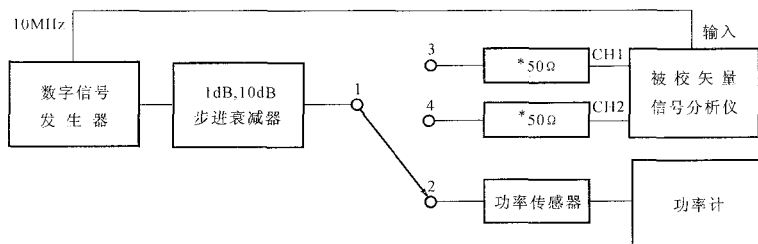
$$\delta = P - P_0 \quad (\text{dB}) \quad (2)$$

7.5.6 对表 A.5 中的每个校准点，重复 7.5.2 ~ 7.5.5。

7.5.7 被校仪器有第 2 通道、独立 RF 通道或更多通道时，重复 7.5.2 ~ 7.5.6 操作。

[注 4] 可以用射频功率计加射频衰减器代替测量接收机校准幅度测量示值。步骤如下：

a) 仪器连接如图 7 所示。



* 校准输入阻抗为 $1\text{M}\Omega$ 的通道时，接上 50Ω 通过式负载。

图 7 载波幅度测量示值的校准

b) 先复现标准电平 P_0 ：将 1 与 2 相连，置步进衰减器的衰减量为 $A_{(0\text{dBm})}$ ，（例如 20dB）。按校准要求设置数字信号发生器的输出频率（例如 9.876MHz），并调整其输出电平（例如 20dBm）使功率计有合适的读数 $P_{(0\text{dBm})}$ （例如 0dBm）。若置衰减器的衰减量为 A ，所复现的标准电平值 P_0 按式 (3) 计算。

$$P_0 = P_{(0\text{dBm})} - (A - A_{(0\text{dBm})}) \quad (\text{dBm}) \quad (3)$$

c) 将 1 与 3 相连。置被校仪器为幅度测量状态，按校准要求设置其输入阻抗、中心频率和量程。调整衰减器的衰减量，使信号电平满足校准点的“标准电平值 P_0 ”要求，记录被校仪器的幅度测量示值 P 。

d) 按式 (4) 计算幅度测量示值相对误差 δ 。

$$\delta = P - P_0 \quad (\text{dB}) \quad (4)$$

e) 更换频率，重复 b) ~ d)，直到完成所有校准。

f) 被校仪器有第 2 通道、独立 RF 通道或更多通道时，重复 b) ~ e) 操作。

[注 5] 由于被校矢量信号分析仪使用选频方式测量载波幅度，测量接收机应设置为选频测量方式，否则应考虑两种测量方式不同所引入的附加误差。这种误差主要由于信号的谐波引起。

7.6 载波幅度测量非线性的校准^[注 6]

7.6.1 按 7.4.1 ~ 7.4.4 步骤操作，测量点按附录 A 表 A.6 选取，量程置为 0dBm，测量结果记于表 A.6 中。

7.6.2 按式 (5) 计算载波幅度测量非线性 NL 。

$$NL = (P - P_{(0\text{dBm})}) - (P_0 - P_{0(0\text{dBm})}) \quad (\text{dB}) \quad (5)$$

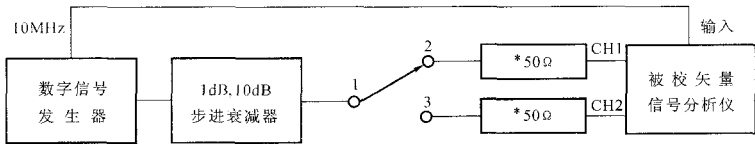
$P_{(0dBm)}$ 和 $P_{0(0dBm)}$ 分别为数字信号发生器输出 0dBm 时, 被校矢量信号分析仪和测量接收机的读数;

P 和 P_0 分别为数字信号发生器输出不是 0dBm 的其他值时, 被校矢量信号分析仪和测量接收机的读数。

7.6.3 被校仪器有第 2 通道、独立 RF 通道或更多通道时, 重复 7.6.1~7.6.2 操作。

[注 6] 可以用射频衰减器代替测量接收机校准幅度测量非线性。步骤如下:

a) 在图 8 中, 将 1 与 2 相连。置数字信号发生器输出电平为 0dBm, 频率按校准要求设定。



* 校准输入阻抗为 1MΩ 的通道时, 接上 50Ω 通过式负载。

图 8 载波幅度测量示值的校准

b) 置被校仪器输入量程为 0dBm, 置衰减器的衰减量为 0dB, 读出被校仪器示值 $P_{(0dB)}$ 。

c) 改变衰减器的衰减量为 A , 读出被校仪器示值 P 。按式 (6) 计算载波幅度测量非线性 NL 。

$$NL = P - P_{(0dB)} + A \quad (\text{dB}) \quad (6)$$

7.7 双通道测量不一致性的校准

7.7.1 仪器连接如图 9 所示。

7.7.2 按附录 A 表 A.7-1 和表 A.7-2 置数字信号发生器的载波频率和输出电平。

7.7.3 置被校仪器为幅度/相位测量状态, 通道 1 输入量程与信号源的输出电平相同。读取幅度测量示值 P_1 , 相位示值 Φ_1 , 分别记于表 A.7-1 和表 A.7-2 中。

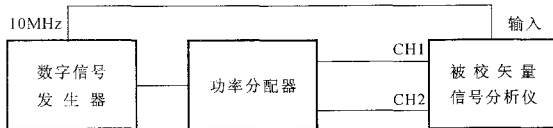


图 9 双通道测量不一致性的校准

7.7.4 置通道 2 与通道 1 完全相同的状态。同样读出通道 2 示值 P_2 , Φ_2 , 分别记于表 A.7-1 和表 A.7-2 中。

7.7.5 互换通道 1 和通道 2 与功率分配器的连接, 重复 7.7.3~7.7.4, 得读数 P'_1 ,

Φ'_1 , P'_2 , Φ'_2 。

7.7.6 按式 (7) 和式 (8) 计算双通道幅度测量不一致性 MP 和相位测量不一致性 $M\Phi$ 。

$$MP = \frac{1}{2} [(P_1 + P'_1) - (P_2 + P'_2)] \quad (\text{dB}) \quad (7)$$

$$M\Phi = \frac{1}{2} [(\Phi_1 + \Phi'_1) - (\Phi_2 + \Phi'_2)] \quad (^\circ) \quad (8)$$

7.8 输入通道互调失真的校准

7.8.1 仪器连接如图 10 所示。

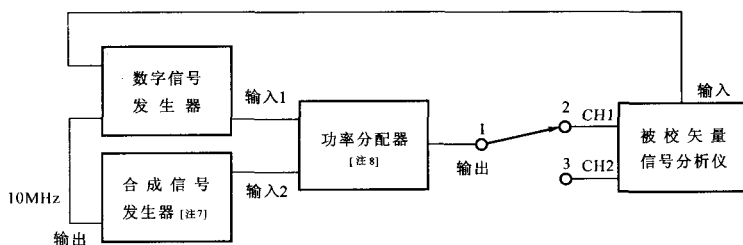


图 10 输入通道互调失真的校准

7.8.2 将 1 与 2 相连, 按附录 A 表 A.8 分别置合成信号发生器和数字信号发生器的频率 (例如, $A = 176.543\text{kHz}$, $B = 177.530\text{kHz}$)^[注9], 电平均为 6dBm。

7.8.3 将被校仪器通道 1 设在载波幅度测量状态, 中心频率按附录 A 表 A.8 “信号与互调信号频率”一栏中设定, 频率跨度以能分辨和频、差频为宜。细调数字信号发生器输出电平, 使被校仪器指示的两信号的谱线幅度相等, 例如 0dBm。

7.8.4 用频标分别读出信号幅度 P_A (或 P_B) 和互调信号幅度 P_{IM} , 记于表 A.8 中, 并按式 (9) 计算互调失真值 IM 。

$$IM = P_{IM} - P_A \quad (\text{dBc}) \quad (9)$$

7.8.5 被校仪器有第 2 通道时, 将 1 与 3 相连, 重复 7.8.2~7.8.4 操作。

[注 7] 如果数字信号发生器有独立双通道输出, 可不用合成信号发生器。如果数字信号发生器可在一个输出口输出双频, 双电平信号, 可不用合成信号发生器和功率分配器。

[注 8] 可用定向耦合器代替功率分配器。

[注 9] A , B 频率值按技术指标选取, 或者按二者差值在 (1~10) kHz 范围选取。

7.9 输入通道谐波失真的校准

7.9.1 仪器连接如图 11 所示。

7.9.2 将 1 与 2 相连, 置数字信号发生器的输出电平约 0dBm (使被校仪器处于满量程状态), 按表 A.9 “信号频率”一栏置其频率。

7.9.3 置被校仪器通道 1 为幅度测量状态, 量程为 0dBm, 中心频率按附录 A 表 A.9

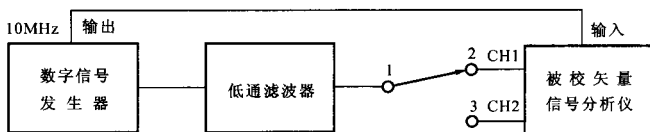


图 11 输入通道谐波失真的校准

“信号频率”或“谐波频率”一栏设置。频率跨度适中。

7.9.4 用频标分别读出基波幅度值 P_0 和谐波幅度值 P_H ，并按式 (10) 计算谐波失真 HD 。

$$HD = P_H - P_0 \quad (\text{dBc}) \quad (10)$$

7.9.5 被校仪器有第 2 通道时，将 1 与 3 相连，重复 7.9.2~7.9.4 操作。有独立 RF 通道或更多通道时，用同样的方法校准。

7.10 输入通道内部噪声的校准

7.10.1 在被校仪器通道 1 和通道 2 上都连接上 50Ω 负载，如图 12 所示。

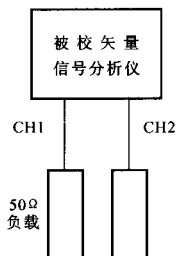


图 12 输入通道内部噪声的校准/源到通道串扰的校准

7.10.2 将被校仪器设为幅度测量状态，中频放大及参考电平都设到最高灵敏度状态，频率跨度和分辨率带宽按指标要求设置，附录 A 表 A.10 的“带宽”一栏是分辨率带宽的常见设置。频率跨度一般设为带宽的 100 倍。改变中心频率，并用频标在表 A.10 的“频率范围”内找到最大噪声电平值 P_N ，记于表 A.10 中。按式 (11) 计算输入通道内部噪声 IN ^[注 10]。

$$IN = P_N - 10 \log(BW) - 3 \quad (\text{dBm/Hz}) \quad (11)$$

式中， BW ——被校仪器分辨率带宽，Hz。

7.10.3 被校仪器有第 2 通道，独立 RF 通道或更多通道时，重复 7.10.2 操作。

[注 10] 被校仪器有噪声测量功能时，可遵循说明书指引进行测量。

7.11 源到通道串扰的校准

7.11.1 被校仪器的通道 1 和通道 2 都接上 50Ω 负载, 如图 12 所示。

7.11.2 置被校仪器内部信号源输出幅度到最大值 P_{IN} (例如, 20dBm, 见附录 A 表 A.11 “信号源电平” 一栏), 并按“频率”一栏设置其频率。

7.11.3 置被校仪器于幅度测量状态, 被干扰通道置为最高灵敏度。合理设置频率跨度 (如 30Hz) 和分辨率带宽 (如 0.3Hz), 显示刻度设为自动, 使之能观察尽可能低的电平。

7.11.4 用频标测出与源输出频率相同的谱线的幅度值 P , 记于表 A.11 中, 并按式 (12) 计算源到通道 1 (或通道 2) 串扰值 CRT 。

$$CRT = P - P_{IN} \quad (\text{dBc}) \quad (12)$$

7.12 通道间串扰的校准

7.12.1 被校仪器的通道 2 (或通道 1) 接上 50Ω 负载, 另一通道——通道 1 (或通道 2) 接到数字信号发生器的输出, 如图 13 所示。

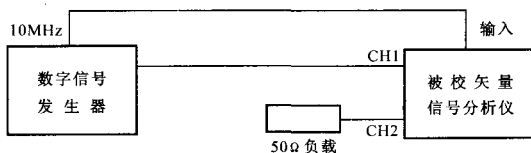


图 13 通道间串扰的校准

7.12.2 置被校矢量信号分析仪于幅度测量状态, 干扰通道的量程为 20dBm。

7.12.3 置数字信号发生器输出电平 P_{IN} 为 20dBm (使干扰通道处于最大量程的满载状态)。按附录 A 表 A.12 设置其频率。

7.12.4 置被校矢量信号分析仪的被干扰通道为最高灵敏度。合理设置频率跨度 (如 30Hz) 和分辨率带宽 (如 0.3Hz)。显示刻度范围设为自动, 使之能观察尽可能低的电平。

7.12.5 用频标测出与信号频率相同的谱线的幅度值 P , 记于表 A.12 中, 并按式 (13) 计算通道 1 (或通道 2) 到通道 2 (或通道 1) 串扰值 CRT 。

$$CRT = P - P_{IN} \quad (\text{dBc}) \quad (13)$$

7.13 输入口回波损耗的校准

7.13.1 仪器连接如图 14 所示。

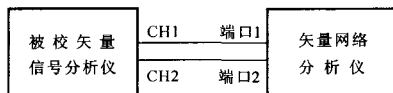


图 14 输入口回波损耗的校准

7.13.2 被校仪器设为接收机模式。矢量网络分析仪置于 S_{11} (或 S_{22}) 测量状态, 测试

电平设为 0dBm, 按附录 A 表 A.13 的“频率范围”一栏设置测试频率范围。按矢量网络分析仪说明书操作, 读出所设频率范围内的最大(劣)值, 并记于表 A.13 中。

7.13.3 被校仪器有第 2 通道、独立 RF 通道或更多通道时, 重复 7.13.2 操作。

7.14 源输出口回波损耗的校准

7.14.1 仪器连接如图 15 所示。

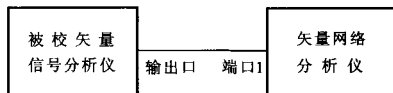


图 15 源输出口回波损耗的校准

7.14.2 被校仪器可设在接收机模式, 关闭内部信号源的输出, 或把电平设到最低。

7.14.3 矢量网络分析仪置于 S_{11} 测量状态, 测试电平设为 0 dBm, 按附录 A 表 A.14 的“频率范围”一栏设置其频率范围。按矢量网络分析仪说明书操作, 读出所设频率范围内的最大(劣)值, 记于表 A.14 中。

7.15 信号源输出幅度的校准

7.15.1 仪器连接如图 16 所示。

7.15.2 按附录 A 表 A.15 “频率”一栏设置被校仪器的输出频率, 按“被校示值”一栏设定输出电平值 P 。



图 16 信号源输出幅度示值的校准

7.15.3 按说明书指引操作测量接收机, 读出标准测量接收机的电平读数 P_0 , 记于表 A.15 中。

7.15.4 按式 (14) 计算被校仪器内部信号源输出幅度误差 δ 。

$$\delta = P - P_0 \quad (\text{dB}) \quad (14)$$

7.15.5 被校矢量信号分析仪有独立 IF 信号源单元和 RF 信号源单元, 应分别校准。

[注 11] 可用能满足频率范围, 电平范围和电平测量不确定度要求的频谱分析仪代替测量接收机。

7.16 信号源谐波失真的校准

7.16.1 仪器连接如图 17 所示。

7.16.2 置被校矢量信号分析仪内部信号源的输出电平为最大值(如 20dBm), 按附录 A 表 A.16 “输出频率”一栏设置其频率。

7.16.3 置频谱分析仪中心频率与信号源输出频率值(基波)相同, 或等于其 2 倍值(2 次谐波), 或等于其 3 倍值(3 次谐波), 频率跨度适中(以能观察谱线为宜, 如

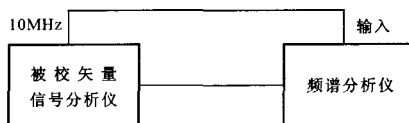


图 17 信号源谐波失真校准

100Hz), 分辨率带宽为自动。

7.16.4 用频标分别读基波幅度值 P_1 , 二次谐波幅度值 P_2 和三次谐波幅度值 P_3 , 记于表 A.16, 并按式 (15) 计算谐波失真 HD 。

$$HD = P_2 - P_1 \text{ 或 } HD = P_3 - P_1 \quad (\text{dBc}) \quad (15)$$

7.16.5 被校矢量信号分析仪有独立 IF 信号源单元和 RF 信号源单元, 应分别校准。

7.17 测量通道相应噪声的校准

7.17.1 仪器连接如图 18 所示。

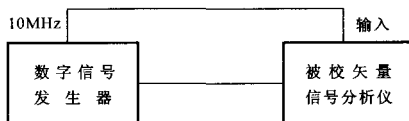


图 18 测量通道相位噪声校准

7.17.2 置数字信号发生器输出电平为 -20dBm , 频率按附录 A 表 A.17 “信号频率”一栏设置。

7.17.3 置被校仪器为幅度测量状态, 中心频率与信号发生器相同, 按“带宽”一栏设置分辨率带宽, 置频率跨度为带宽的 30 倍。用频标测量信号电平 P_s 和偏离中心频率规定值 (见表 A.17 “偏移频率”) 处的噪声电平 P_N 。

7.17.4 按式 (16) 计算测量通道相位噪声 PN 。

$$PN = P_N - P_s - 10 \log(BW) - 3 \quad (\text{dBc/Hz}) \quad (16)$$

式中, BW ——测量带宽, Hz。

7.18 数字量 (误差矢量幅度—EVM, 矢量幅度误差, 相位误差, I/Q 原点偏移及频率偏移) 测量示值的校准

7.18.1 仪器连接如图 19 所示。

7.18.2 置数字信号发生器输出电平为 0 dBm , 按附录 A 表 A.18-1 ~ 表 A.18-5 “载波频率”一栏设置输出频率, 置调制方式为数字调制, 通信制式为 GSM (或 CDMA, NADC 或 DECT 等), 编码的码型为伪随机。

7.18.3 置被校矢量信号分析仪和标准矢量信号分析仪为相同的状态: 输入为接收机状态的数字解调模式, 通信制式与信号发生器相同。合理设置输入电平范围, 频率范围, 中心频率, 频率跨度, 数据的长度 (例如 100 个符号)。分辨率带宽设为“自动”, 触发

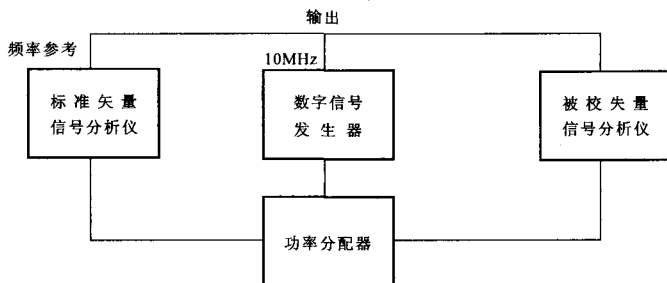


图 19 数字量测量的校准

设为“内部源”，“自动”，“延时 1ms”。显示方式为符号表与误差汇总 (Symbol Table/Error Summary)。将各项测量结果记于附录 A 表 A.18-1~表 A.18-5 中。显示的项目有：误差矢量幅度 (EVM)，矢量幅度误差，相位误差， I/Q 原点偏移，频率偏移等^{[注12][注13]}。

7.18.4 测量结果用绝对值表示的项目 (如误差矢量幅度 - EVM，矢量幅度误差，相位误差，频率偏移等)，按式 (17) 计算测量误差：

$$\Delta N = N - N_0 \quad (\%, ^\circ, \text{或 Hz}) \quad (17)$$

式中， ΔN ——被校仪器的数字量测量误差；

N ——被校仪器数字量测量示值；

N_0 ——标准矢量信号分析仪测量值。

7.18.5 测量结果用相对值表示的项目 (如 I/Q 原点偏移等)，也可以按式 (18) 计算测量误差，但计算结果是相对值 dB。与百分比的相对误差的关系表示为：

$$\Delta N = 20 \log (1 + \delta N) \quad (\text{dB}) \quad (18)$$

式中， ΔN ——单位为 dB 的相对测量误差；

δN ——百分比相对测量误差。

[注 12] 对于不同通信制式，所显示的项目有所不同。

[注 13] 有些矢量分析仪不能在同一状态下显示全部测量项目，此时要按 7.18.3~7.18.5 重复操作，以得到全部结果。

8 校准结果的表达

校准结果用校准证书或校准报告表达。校准证书或报告由封面和校准数据页组成。封面由校准机构 (实验室) 确定统一的格式。校准数据页按附录 A 各表格填写，并附有不确定度说明。校准证书或校准报告上的信息至少应包括以下信息：

- a) 标题，如“校准证书”或“校准报告”；
- b) 实验室名称和地址；
- c) 进行校准的地点；

- d) 证书或报告的惟一性标识（如编号），每页及总页数的标识；
- e) 送校者的名称和地址；
- f) 被校对象的描述和明确标识；
- g) 进行校准的日期，如果校准结果的有效性与被校对象接收日期有关时，还应注明接收日期；
- h) 如果抽样程序与校准的有效性有关时，应予说明；
- i) 校准所依据的技术规范，包括名称和代号；
- j) 对所用测量标准的溯源性及有效性的说明；
- k) 校准环境的描述；
- l) 校准结果及测量不确定度的说明；
- m) 校准人和签发人签名，签发人的职务或等效标识，以及签发日期。

9 复校时间间隔

矢量信号分析仪两次校准的时间间隔由用户根据使用频率确定，建议不超过1年。修理或调整后，应经校准后才能投入使用。

附录 A

矢量信号分析仪校准记录格式

表 A.1 外观与工作正常性检查

记录序号	项目名称	检查记录	结论

表 A.2 矢量信号测量功能的检查

记录序号	项目名称	检查记录	结论

表 A.3 I/Q 信号测量功能的检查

记录序号	项目名称	检查记录	结论

表 A.4 频率测量示值的校准 (输入信号电平: 0dBm)

预热时间 (min)	标准频率值 f_0 (MHz)	被校示值 f (MHz)	相对误差 $\delta = (f - f_0) / f_0$ ($\times 10^{-6}$)
20	10		
30	10		
40	10		
50	10		

表 (续)

预热时间 (min)	标准频率值 f_0 (MHz)	被校示值 f (MHz)	相对误差 $\delta = (f - f_0) / f_0$ ($\times 10^{-6}$)
60	10		
	100		
		
		

表 A.5 载波幅度测量示值的校准

通道	输入阻抗	频率 (MHz)	量程 (dBm)	信号电平值 (dBm)	标准电平值 P_0 (dBm)	被校指示值 P (dBm)	误差 $\delta = P - P_0$ (dB)
CH1	50 Ω	9.876	20	20			
			10	10			
			0	0			
			-10				
						
	1M Ω	9.876	20	18			
			10	10			
			0	0			
			-10				
						
CH2	50 Ω	9.876	20	18			
			10	10			
			0	0			
			-10				
						
	1M Ω	9.876	20	18			
			10	10			
			0	0			
			-10				
						
CH1			20	18			
			10	10			
			0	0			
			-10				
						
CH2			20	18			
			10	10			
			0	0			
			-10				
						

表 (续)

通道	输入阻抗	频率 (MHz)	量程 (dBm)	信号电平值 (dBm)	标准电平值 P_0 (dBm)	被校指示值 P (dBm)	误差 $\delta = P - P_0$ (dB)	
RF	50Ω	100	20	18				
			10	10				
			0	0				
			-10					
							
			20	18				
			10	10				
			0	0				
			-10					
							

表 A.6 载波幅度测量非线性的校准 (输入阻抗: 50Ω; 量程: 0 dBm)

通道	频率 (MHz)	信号电平 (dBm)	被校指示值 $P_{(0dBm)}, P$ (dBm)	标准器读数 $P_{0(0dBm)}, P_0$ (dBm)	幅度测量非线性 $N = (P - P_{(0dBm)}) -$ $(P_0 - P_{0(0dBm)})$ (dB)
CH1	5	0			——
		-10			
		-20			
		-30			
				
CH2	5	0			——
		-10			
		-20			
		-30			
				
RF	935	0			——
		-10			
		-20			
		-30			
				

表 A.7-1 双通道幅度测量不一致性的校准

频率 (MHz)	信号电平 (dBm)	通道 1 读数 P_1 (dBm)	通道 2 读数 P_2 (dBm)	通道 1 读数 P'_1 (dBm)	通道 2 读数 P'_2 (dBm)	幅度测量 不一致性 $MP = [(P_1 + P'_1) - (P_2 + P'_2)]/2$ (dB)
9.876	10					
9.876	0					
9.876	-10					
9.876	-20					
9.876	-30					
9.876	……					
0.049234	10					
0.049234	0					
0.049234	-10					
0.049234	-20					
0.049234	-30					
0.049234	……					

表 A.7-2 双通道相位测量不一致性的校准

频率 (MHz)	信号电平 (dBm)	通道 1 读数 Φ_1 (°)	通道 2 读数 Φ_2 (°)	通道 1 读数 Φ'_1 (°)	通道 2 读数 Φ'_2 (°)	相位测量 不一致性 $M\Phi = [(\Phi_1 + \Phi'_1) - (\Phi_2 + \Phi'_2)]/2$
9.876	10					
9.876	0					
9.876	-10					
9.876	-20					
9.876	-30					
9.876	……					
0.049234	10					
0.049234	0					
0.049234	-10					
0.049234	-20					
0.049234	-30					
0.049234	……					

表 A.8 输入通道互调失真的校准 (信号频率: $A = 176.543\text{kHz}$, $B = 177.530\text{kHz}$)

通道	信号与互调信号	信号与互调信号频率 (kHz)	信号幅度 P_A 与互调信号幅度 P_{IM} (dBm)	互调失真 $IM = P_{IM} - P_A$ (dBc)
CH1	A	176.54		—
	2A - B	175.556		
	2B - A	178.517		
CH2	A	176.54		—
	2A - B	175.556		
	2B - A	178.517		

表 A.9 输入通道谐波失真的校准

通道	基波/谐波	信号频率与谐波频率 (MHz)	信号电平 P_0 与谐波电平 P_H (dBm)	谐波失真 $HD = P_H - P_0$ (dBc)
CH1	基波	0.975		—
	2次	1.95		
	3次	2.925		
CH2	基波	0.975		—
	2次	1.95		
	3次	2.925		
RF	基波	0.975		—
	2次	1.95		
	3次	2.925		

表 A.10 输入通道内部噪声的校准

通道	频率范围	带宽 BW (Hz)	噪声示值 P_N (dBm)	内部噪声 $IN = P_N - 10 \log(BW) - 3$ (dBm/Hz)
CH1	1kHz ~ 40kHz	1000		
	40kHz ~ 10MHz			
	1kHz ~ 40kHz	10		
	40kHz ~ 10MHz			
CH2	1kHz ~ 40kHz	1000		
	40kHz ~ 10MHz			
	1kHz ~ 40kHz	10		
	40kHz ~ 10MHz			
RF	(10 ~ 1000) MHz	10		
	(1000 ~ 2650) MHz			

表 A.11 源到通道串扰的校准

串扰模式	频率 (MHz)	信号源电平 P_{IN} (dBm)	被校指示值 P (dBm)	串扰 $CRT = P - P_{IN}$ (dBc)
源到 CH1	0.1	20		
	9.75	20		
源到 CH2	0.1	20		
	9.75	20		

表 A.12 通道间串扰的校准

串扰模式	频率 (MHz)	信号源电平 P_{IN} (dBm)	被校指示值 P (dBm)	串扰 $CRT = P - P_{IN}$ (dBc)
CH1 到 CH2	0.1	20		
	9.75	20		
CH2 到 CH1	0.1	20		
	9.75	20		

表 A.13 输入口回波损耗的校准

通道	频率范围 (MHz)	回波损耗 S_{11} (dB)
CH1	0.3 ~ 10	
CH2	0.3 ~ 10	
RF	10 ~ 100	
	100 ~ 1000	
	1000 ~ 2650	

表 A.14 源输出口回波损耗的校准

输出口	频率范围 (MHz)	回波损耗 S_{11} (dB)
IF	0.3 ~ 10	
RF	10 ~ 100	
	100 ~ 1000	
	1000 ~ 2650	

表 A.15 信号源输出幅度的校准

信号源	频率 (MHz)	被校示值 P (dBm)	标准器读数 P_0 (dBm)	误差 $\delta = P - P_0$ (dB)
IF 单元	0.03	0		
	9.5	20		
		10		
		6		
		0		
		-10		
	…			
…	0			
…	0			
RF 单元	10	0		
	100	20		
		10		
		6		
		0		
		-10		
	…			
	500	0		
800	0			
…	0			

表 A.16 信号源谐波失真的校准

信号源	信号频率 (MHz)	基波/谐波	测试频率 (MHz)	标准器读数 P_1, P_2, P_3 (dBm)	谐波失真 $HD = P_2 - P_1$ 或 $HD = P_3 - P_1$ (dBc)
IF 单元	0.002395	基波	0.002395		—
	0.002395	2 次谐波	0.00479		
	0.002395	3 次谐波	0.007185		
	…	基波	0.00784		—
	…	2 次谐波	0.01568		
…	3 次谐波	0.02352			
RF 单元	116.19	基波	116.19		—
	116.19	2 次谐波	232.38		
	116.19	3 次谐波	348.57		
	935	基波	935		—
	935	2 次谐波	1870		
935	3 次谐波	2805			

表 A.17 测量通道相位噪声的校准 (输入信号电平 $P_s = -20\text{dBm}$)

信号频率 (MHz)	偏移频率 (kHz)	带宽 BW (Hz)	被校噪声读数 P_N (dBm)	相位噪声 $PN = P_N - P_s - 10 \log (BW) - 3$ (dBc/Hz)
100	0.1	10		
	1	100		
	10	1000		
	100	1000		
	0.1	10		
	1	100		
	10	1000		
	100	1000		

表 A.18-1 数字量测量示值的校准——误差矢量幅度 (EVM)

通信制式	载波频率 (MHz)	载波电平 (dBm)	标准器读数 N_0 (%)	被校示值 N (%)	误差 $\Delta N = N - N_0$ (%)
GSM	935	0			
	1840	0			
			

表 A.18-2 数字量测量示值的校准——矢量幅度误差

通信制式	载波频率 (MHz)	载波电平 (dBm)	标准器读数 N_0 (%)	被校示值 N (%)	误差 $\Delta N = N - N_0$ (%)
GSM	935	0			
	1840	0			
			

表 A.18-3 数字量测量示值的校准——相位误差

通信制式	载波频率 (MHz)	载波电平 (dBm)	标准器读数 N_0 (°)	被校示值 N (°)	误差 $\Delta N = N - N_0$ (°)
GSM	935	0			
	1840	0			
			

表 A.18-4 数字量测量示值的校准——I/Q 原点偏移

通信制式	载波频率 (MHz)	载波电平 (dBm)	标准器读数 N_0 (dB)	被校示值 N (dB)	误差 $\Delta N = N - N_0$ (dB)
GSM	935	0			
	1840	0			
			

表 A.18-5 数字量测量的校准——频率偏移

通信制式	载波频率 (MHz)	载波电平 (dBm)	标准器读数 N_0 (Hz)	被校示值 N (Hz)	误差 $\Delta N = N - N_0$ (Hz)
GSM	935	0	10		
	1840	0	10		
			

附录 B

主要项目校准不确定度分析实例

B.1 载波幅度测量示值的校准的不确定度分析

B.1.1 测量方法

先把被校矢量信号分析仪与数字信号发生器相连，测得载波信号电平 P_{11} ，如图 B.1 所示。再把测量接收机与数字信号发生器相连，在不改变数字信号发生器任何设置的条件下，测得载波信号电平 P_{12} ，如图 B.2 所示。校准时按式 (B.1) 计算被校矢量信号分析仪的测量误差：

$$\Delta P = P_{11} - P_{12} \quad (\text{dB}) \quad (\text{B.1})$$

也就是 P_{12} 是 P_{11} 的约定真值。校准不确定度分析的目的是给出 P_{11} 的不确定度的估算值。

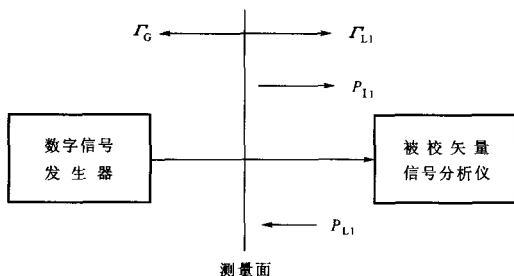


图 B.1 载波幅度测量的校准接线图——被校仪器测量数字信号发生器电平

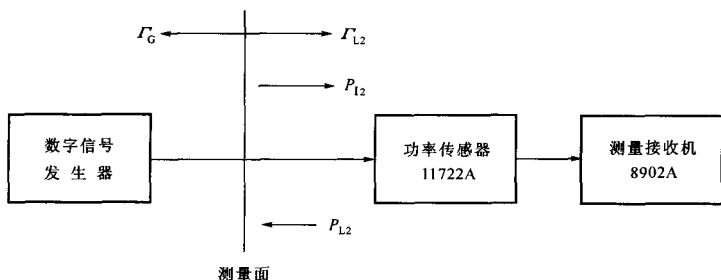


图 B.2 载波幅度测量的校准接线图——测量接收机测量数字信号发生器电平

B.1.2 数学模型

由图 B.1 和图 B.2 分别得到式 (B.2) 和式 (B.3)。

$$P = P_{11} |1 - \Gamma_c \Gamma_{L1}|^2 \quad (\text{B.2})$$

$$P = P_{12} |1 - \Gamma_C \Gamma_{L2}|^2 = \frac{P_{CK}}{K_C} |1 - \Gamma_C \Gamma_{L2}|^2 \quad (\text{B.3})$$

图和式中, P ——信号发生器输出功率电平值;

P_{11} ——入射到被校分析仪的功率电平值;

P_{L1} ——由被校分析仪反射的功率电平值;

P_{12} ——入射到测量接收机 8902A 的功率电平值;

P_{L2} ——由测量接收机 8902A 反射的功率电平值;

P_{CK} ——测量接收机 8902A 的显示值;

K_C ——功率传感器 11722A 的校准因子;

$P_{12} = P_{CK}/K_C$;

Γ_C ——信号发生器输出端的反射系数^[注1];

Γ_{L1} ——被校分析仪输入端的反射系数;

Γ_{L2} ——测量接收机输入端的反射系数。

由式 (B.2) 和 (B.3) 得到:

$$P_{11} = \frac{P_{CK}}{K_C} \times \frac{|1 - \Gamma_C \Gamma_{L2}|^2}{|1 - \Gamma_C \Gamma_{L1}|^2} \quad (\text{B.4})$$

因为很难在校准条件下确定反射系数的模和相位的值。通常能得到的是用标准仪器(如网络分析仪)分别测量各个端口的反射系数。这显然与校准条件下的反射系数是不同的,因此式 (B.4) 中与反射系数有关的项无法修正。现以最坏情况估算,可以得到 P_{11} 的范围为:

$$\begin{aligned} P_{11} &= P_{12} (1 \pm 2|\Gamma_C||\Gamma_{L1}|) / (1 \pm 2|\Gamma_C||\Gamma_{L2}|) \\ &\approx \frac{P_{CK}}{K_C} (1 \pm 2|\Gamma_C||\Gamma_{L1}|) (1 \mp 2|\Gamma_C||\Gamma_{L2}|)^{[\text{注2}]} \end{aligned} \quad (\text{B.5})$$

比较式 (B.1) 与式 (B.5), 可以看出, $\pm 2|\Gamma_C||\Gamma_{L1}|$ 和 $\mp 2|\Gamma_C||\Gamma_{L2}|$ 是失配误差项, 分别记为 M_1 和 M_2 。

[注 1] 由于测量条件不同, Γ_C 在式 (B.1) 和式 (B.2) 中并不一定相等。但若用于计算失配误差, 取的是其最大允许误差限, 则 Γ_C 在两式中是相等的。

[注 2] $a = (1 \pm c)$, 表示 $(1 - c) \leq a \leq (1 + c)$, 其中 $a, c > 0$; 当 $c \ll 1$ 时, $a = 1/(1 + c) \approx (1 - c)$ 。

B.1.3 方差和灵敏系数

依 $u^2(Y) = \sum (\partial f/\partial X_i)^2 u^2(X_i)$ 及 $P_{11} = (P_{CK}/K_C) (1 + M_1) (1 + M_2)$ 并假设 M_1 和 M_2 互不相关, 得:

$$\left(\frac{u(P_{11})}{P_{11}}\right)^2 = \left(\frac{u(P_{CK})}{P_{CK}}\right)^2 + \left(\frac{u(K_C)}{K_C}\right)^2 + \left(\frac{u(M_1)}{1 + M_1}\right)^2 + \left(\frac{u(M_2)}{1 + M_2}\right)^2$$

通常, $M_1, M_2 \ll 1$, 有 $1 + M_1 \approx 1$ 和 $1 + M_2 \approx 1$, 因此有:

$$\left(\frac{u(P_{11})}{P_{11}}\right)^2 \approx \left(\frac{u(P_{CK})}{P_{CK}}\right)^2 + \left(\frac{u(K_C)}{K_C}\right)^2 + \left(\frac{u(M_1)}{1}\right)^2 + \left(\frac{u(M_2)}{1}\right)^2 \quad (\text{B.6})$$

为了方便叙述,用相对不确定度 $u_c^2(P_{11})$, $u^2(P_{CK})$ 和 $u^2(K_C)$, 分别表示 $\left(\frac{u(P_{11})}{P_{11}}\right)^2$, $\left(\frac{u(P_{CK})}{P_{CK}}\right)^2$ 和 $\left(\frac{u(K_C)}{K_C}\right)^2$, 并把失真误差分量 $u(P_D)$, A 类评定分量 $u(P_S)$ 计算在内, 上式变为:

$$u_c^2(P_{11}) = u^2(P_S) + u^2(P_{CK}) + u^2(K_C) + u^2(M_1) + u^2(M_2) + u^2(P_D) \quad (B.7)$$

其中, $u^2(M_1) = (21\Gamma_G |1\Gamma_{L1}|)^2$; $u^2(M_2) = (21\Gamma_G |1\Gamma_{L2}|)^2$ 。

B.1.4 计算各分量标准不确定度

设测量点为 20 ~ -70dBm。测量点为 0dBm 时, 不确定度最小。测量点为 -70dBm 时, 不确定度最大。

B.1.4.1 多次测量平均值的实验标准差 $u(P_S)$

表中, $\Delta P = P_{11} - P_{12}$

测量点 (0dBm)

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ΔP (dB)	0.14	0.18	0.12	0.15	0.19	0.16	0.14	0.18	0.20	0.11

$$u(P_S) = 0.030\text{dB}。$$

测量点 (-70dBm)

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ΔP (dB)	0.45	0.30	0.24	0.34	0.43	0.48	0.40	0.35	0.32	0.35

$$u(P_S) = 0.074\text{dB}。$$

B.1.4.2 由 8902A 指标估算 $u(P_{CK})$

引用 3.4.2 的讨论, 得到以下两分量:

$$\begin{aligned} u(P_{CK1}) (\text{相对电平测量}) &= \frac{(0.02\text{dB} + 0.02\text{dB}/\text{中频量程} + 0.02\text{dB}/\text{RF 量程})}{\sqrt{3}} \\ &= \frac{(0.02 \sim 0.20)}{\sqrt{3}} \text{dB}; \end{aligned}$$

$$u(P_{CK2}) (\text{校准器, 50MHz}) = \frac{0.10}{\sqrt{3}} \text{dB}。$$

B.1.4.3 功率传感器 11722A 的校准因子引入的不确定度 $u(K_C)$

引用 3.4.3 的讨论, 得到以下两分量:

$$u(K_{C1}) (\text{功率传感器 11722A 的校准因子}) = \frac{(0.10 \sim 0.25)}{\sqrt{3}} \text{dB};$$

$$\begin{aligned} u(K_{C2}) (\text{功率传感器 11722A 的线性}) &= \frac{0.02\text{dB} + 0.02\text{dB}/\text{每量程}}{\sqrt{3}} \\ &= \frac{(0.02 \sim 0.16)}{\sqrt{3}} \text{dB}。 \end{aligned}$$

B.1.4.4 失配引入的不确定度 $u(M_1)$, $u(M_2)$

功率传感器 11722A 的反射系数模值的允限为 0.12, 信号发生器的反射系数模值的允限为 0.12, 被校分析仪的反射系数模值的允限为 0.18, 按反正弦分布, 包含因子 $\sqrt{2}$ 估算, 结果为:

$$u(M_1) = 2 \times 0.12 \times 0.18 / \sqrt{2} = 4.3\% \sqrt{2} = 0.18 / \sqrt{2} \text{ dB}$$

$$u(M_2) = 2 \times 0.12 \times 0.12 / \sqrt{2} = 2.9\% \sqrt{2} = 0.12 / \sqrt{2} \text{ dB}$$

B.1.4.5 波形失真引入的不确定度 $u(P_D)^{[注3]}$

选频电平测量不确定度的数学模型为: $\delta = -0.5\gamma$ 。使用时很少考虑修正, 因此应计为不确定度项。按一般合成信号发生器的谐波指标^[注4] -30dB (3.2%) 计算, 均匀分布, 包含因子为 $\sqrt{3}$, 则

$$u(P_D) = -0.5 \times 3.2\% / \sqrt{3} = -0.07 / \sqrt{3} \text{ dB}$$

[注3] 若被校仪器和标准仪器都为选频测量, 因 $u(P_0)$ 很小, 可以忽略。本例中, 8902A 为选频测量, 但其功率测量参考是宽带测量, 应认为是宽带测量。

[注4] 只考虑二次和三次谐波。以两者的方和根值作为谐波指标。

B.1.5 标准不确定度一览表 (见表 B.1)

B.1.6 合成标准不确定度

$$u_c(P_{11}) = \sqrt{u^2(P_S) + u^2(P_{CK}) + u^2(K_C) + u^2(M_1) + u^2(M_2) + u^2(P_D)}$$

$$= (0.18 \sim 0.28) \text{ dB}$$

B.1.7 有效自由度

$$\nu_{\text{eff}} = \infty$$

B.1.8 扩展不确定度

$$U_{0.95} = t_{0.95} \times u_c = 2u_c = (0.36 \sim 0.56) \text{ dB}$$

表 B.1 (测量点: 20 ~ -70dBm; 单位: dB)

标准不确定度分量	不确定度来源	标准不确定度值	$c_i = \partial f / \partial X_i$	$u(Y) = c_i u(X_i)$	自由度
$u(P_S)$	测量重复性	(0.030 ~ 0.074) /1	1	(0.030 ~ 0.074)	9
$u(P_{CK})$	测量接收机	(0.059 ~ 0.13) /1			
$u(P_{CK1})$	相对电平	(0.02 ~ 0.2) / $\sqrt{3}$	1	(0.059 ~ 0.13)	∞
$u(P_{CK2})$	校准器	0.10 / $\sqrt{3}$			
$u(K_C)$	功率传感器	(0.059 ~ 0.17) /1			
$u(K_{C1})$	线性	(0.1 ~ 0.25) / $\sqrt{3}$	1	(0.059 ~ 0.17)	∞
$u(K_{C2})$	校准因子	(0.02 ~ 0.16) / $\sqrt{3}$			
$u(M_1)$	失配	0.18 / $\sqrt{2}$	1	0.13	∞
$u(M_2)$	失配	0.12 / $\sqrt{2}$	1	0.09	∞
$u(P_D)$	波形失真	0.07 / $\sqrt{3}$	1	0.04	∞

表 B.1 (续)

$$u_c^2(P_{11}) = (0.18 \sim 0.28)^2$$

$$u_c(P_{11}) = (0.18 \sim 0.28)$$

$$\nu_{\text{eff}}(P_{11}) = \infty$$

$$U = 2u_c(P_{11}) = (0.36 \sim 0.56)$$

B.2 载波幅度测量非线性的校准的不确定度分析

B.2.1 接线和测量方法与载波幅度测量相同。因为是相对电平测量，忽略校准器 $u(P_{CK2})$ ，校准因子 $u(K_{Cl})$ ，失配 $u(M_1)$ ， $u(M_2)$ 和波形失真 $u(P_D)$ 引入的不确定度。0dBm 为参考电平。下面两个表为多次测量平均值的实验标准差 $u(P_S)$

表中， $NL = (P - P_{(0dBm)}) - (P_0 - P_{0(0dBm)})$

测量点 (-10dBm)

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NL (dB)	0.04	0.06	0.08	0.09	0.03	0.05	0.07	0.05	0.07	0.04

$u(P_S) = 0.019 \text{ dB}$ 。

测量点 (-70dBm)

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
NL (dB)	0.15	0.1	0.07	0.12	0.14	0.08	0.09	0.13	0.12	0.11

$u(P_S) = 0.040 \text{ dB}$ 。

B.2.2 最后结果见表 B.2。

表 B.2 (测量点: -10 ~ -70dBm; 单位: dB)

标准不确定度分量	不确定度来源	标准不确定度值	$c_i = \partial f / \partial X_i$	$u(Y) = c_i u(X_i)$	自由度
$u(P_{CK})$	测量接收机线性	$(0.02 \sim 0.18) / \sqrt{3}$	1	$(0.0115 \sim 0.104)$	∞
$u(K_C)$	功率传感器线性	$(0.02 \sim 0.14) / \sqrt{3}$	1	$(0.0115 \sim 0.081)$	∞
$u(P_S)$	测量重复性	$(0.019 \sim 0.040) / 1$	1	$(0.019 \sim 0.040)$	9
$u_c^2(P_{11}) = (0.025 \sim 0.14)^2$ $u_c(P_{11}) = (0.025 \sim 0.14)$ $\nu_{\text{eff}}(P_{11}) = 27 \sim \infty$ $U = 2u_c(P_{11}) = (0.05 \sim 0.28)$					

B.3 信号源输出幅度的校准的不确定度分析

B.3.1 测量方法

用 8902A 直接测量矢量信号分析仪的信号源输出功率, 图 B.3 是接线图。

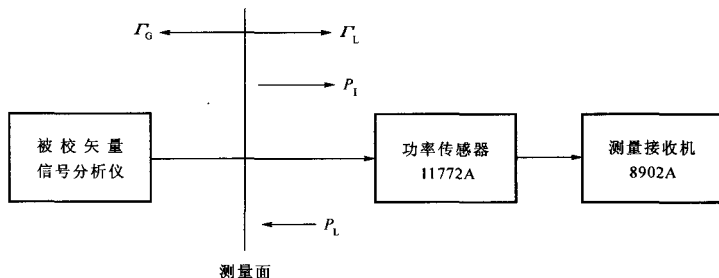


图 B.3 输出电平校准接线图

B.3.2 数学模型

$$P_0 = P_i |1 - \Gamma_G \Gamma_L|^2 = \frac{P_{CK}}{K_C} |1 - \Gamma_G \Gamma_L|^2 \quad (\text{B.8})$$

图和式中, P_0 ——被校矢量信号分析仪的信号源输出功率电平值;

P_i ——入射功率电平值;

P_L ——反射功率电平值;

P_{CK} ——8902A 显示值, 即 8902A 测量 11722A 输出的所得值;

K_C ——11722A 校准因子;

$P_i = P_{CK}/K_C$;

Γ_G, Γ_L ——被校矢量信号分析仪的信号源输出口和 11722A 的反射系数。

依 B.1.2 节的理由, 可以得到 P_0 范围为:

$$P_0 \approx \frac{P_{CK}}{K_C} (1 \pm 2 |\Gamma_G| |\Gamma_L|) \quad (\text{B.9})$$

可以看出, $2 |\Gamma_G| |\Gamma_L|$ 是失配误差项, 记为 $u(M)$ 。

B.3.3 方差和灵敏系数

依 $u_c^2(Y) = \sum (\partial f / \partial X_i)^2 u^2(X_i)$ 及 $P_0 = (P_{CK}/K_C)(1+M)$

得:
$$\left(\frac{u(P_0)}{P_0}\right)^2 = \left(\frac{u(P_{CK})}{P_{CK}}\right)^2 + \left(\frac{u(K_C)}{K_C}\right)^2 + \left(\frac{u(M)}{1+M}\right)^2$$

通常, $M \ll 1$, 有 $1+M \approx 1$, 因此有:

$$\left(\frac{u(P_0)}{P_0}\right)^2 \approx \left(\frac{u(P_{CK})}{P_{CK}}\right)^2 + \left(\frac{u(K_C)}{K_C}\right)^2 + \left(\frac{u(M)}{1}\right)^2 \quad (\text{B.10})$$

为了方便叙述, 用相对不确定度 $u_c^2(P_0)$, $u^2(P_{CK})$ 和 $u^2(K_C)$, 分别表示 $\left(\frac{u(P_0)}{P_0}\right)^2$,

$\left(\frac{u(P_{CK})}{P_{CK}}\right)^2$ 和 $\left(\frac{u(K_C)}{K_C}\right)^2$, 并把失真误差分量 $u(P_D)$, A 类评定分量 $u(P_S)$ 计算在内,

上式变为:

$$u_c^2(P_0) = u^2(P_S) + u^2(P_{CK}) + u^2(K_C) + u^2(M) + u^2(P_D) \quad (\text{B.11})$$

B.3.4 计算各分量标准不确定度

设测量点为 (20 ~ -110) dBm。测量点为 0dBm 时, 不确定度最小。测量点为 -110dBm 时, 不确定度最大。

B.3.4.1 多次测量平均值的实验标准差 $u(P_S)$

表中, $\delta = P - P_0$

测量点 (0dBm)

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
δ (dB)	0.15	0.13	0.18	0.12	0.14	0.16	0.13	0.15	0.17	0.12

$$u(P_S) = 0.021\text{dB}。$$

测量点 (-110dBm)

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
δ (dB)	-0.45	-0.30	-0.35	-0.22	-0.26	-0.34	-0.28	-0.24	-0.34	-0.25

$$u(P_S) = 0.069\text{dB}。$$

B.3.4.2 由 8902A 指标估算 $u(P_{CK})$, 均匀分布, 包含因子为 $\sqrt{3}$ 。

8902A 在使用前, 先把功率传感器接到校准器上进行零校准和 0dBm 校准。所以不确定度分量中应包含校准器的影响。两个分量如下:

$$\begin{aligned} u(P_{CK1})(\text{相对电平测量}) &= \frac{(0.02\text{dB} + 0.02\text{dB}/\text{中频量程} + 0.02\text{dB}/\text{RF 量程})}{\sqrt{3}} \\ &= \frac{(0.02 \sim 0.30)}{\sqrt{3}} \text{dB}; \end{aligned}$$

$$u(P_{CK2})(\text{校准器, } 50\text{MHz}) = \frac{0.10}{\sqrt{3}} \text{dB}。$$

B.3.4.3 功率传感器 11722A 的校准因子引入的不确定度 $u(K_C)$

其不确定度由两部分组成: 上级校准不确定度, 功率传感器的线性。

$$u(K_{C1})(\text{功率传感器 11722A 的校准因子}) = \frac{(0.10 \sim 0.25)}{\sqrt{3}} \text{dB}^{[\text{注}5]};$$

$$\begin{aligned} u(K_{C2})(\text{功率传感器 11722A 的线性}) &= \frac{(0.02\text{dB} + 0.02\text{dB}/\text{每量程})}{\sqrt{3}} \\ &= \frac{(0.020 \sim 0.24)}{\sqrt{3}} \text{dB}。 \end{aligned}$$

[注 5] 包含频率响应引入的不确定度。

B.3.4.4 失配引入的不确定度 $u(M)$

依 B.1.4.4 节的方法估算。功率传感器 11722A 的反射系数允限为 0.12, 设被校仪器

的反射系数允限为 0.12 ~ 0.18, 按反正弦分布, 包含因子 $\sqrt{2}$ 估算, 结果为:

$$u^2(M) = (2\Gamma_c \Gamma_L)^2$$

最小: $u(M) = 2 \times 0.12 \times 0.12 / \sqrt{2} = 2.9\% / \sqrt{2} = 0.12 / \sqrt{2}$ dB。

最大: $u(M) = 2 \times 0.18 \times 0.12 / \sqrt{2} = 4.3\% / \sqrt{2} = 0.18 / \sqrt{2}$ dB。

B.3.4.5 波形失真引入的不确定度 $u(P_D)$

选频电平测量误差的数学模型为: $\delta = -0.5\gamma$ 。按一般合成信号发生器的谐波指标 (-30 ~ -50) dB, 即 (0.32 ~ 3.2)%, 均匀分布, 包含因子 $\sqrt{3}$ 估算:

$$\begin{aligned} u(P_D) &= -0.5 \times (0.32 \sim 3.2)\% / \sqrt{3} \\ &= -(0.16 \sim 1.6)\% / \sqrt{3} \\ &= -(0.014 \sim 0.14) / \sqrt{3} \text{ dB} \end{aligned}$$

B.3.5 标准不确定度一览表 (见表 B.3)

B.3.6 合成标准不确定度

$$\begin{aligned} u_c(P_0) &= \sqrt{u^2(P_S) + u^2(P_{CK}) + u^2(K_c) + u^2(\Gamma) + u^2(P_D)} \\ &= (0.125 \sim 0.32) \text{ dB} \end{aligned}$$

B.3.7 有效自由度

$$\nu_{\text{eff}} = \infty$$

B.3.8 扩展不确定度

$$U_{0.95} = t_{0.95} u_c = 2 u_c = (0.25 \sim 0.64) \text{ dB}$$

表 B.3 (测量点: 20 ~ -110dBm; 单位: dB)

标准不确定度分量	不确定度来源	标准不确定度值	$c_i = \partial f / \partial X_i$	$u(Y) = \sum c_i u(X_i)$	自由度
$u(P_S)$	测量重复性	(0.021 ~ 0.069)/1	1	(0.021 ~ 0.069)	9
$u(P_{CK})$ $u(P_{CK1})$ $u(P_{CK2})$	标准器 相对电平 校准器	(0.059 ~ 0.18) (0.02 ~ 0.30)/ $\sqrt{3}$ 0.10/ $\sqrt{3}$	1	(0.059 ~ 0.18)	∞
$u(K_c)$ $u(K_{c1})$ $u(K_{c2})$	功率传感器 校准因子 传感器线性	(0.059 ~ 0.20) (0.1 ~ 0.25)/ $\sqrt{3}$ (0.02 ~ 0.24)/ $\sqrt{3}$	1	(0.059 ~ 0.21)	∞
$u(M)$	失配	(0.12 ~ 0.18)/ $\sqrt{2}$	1	(0.09 ~ 0.13)	∞
$u(P_D)$	波形失真	(0.014 ~ 0.14)/ $\sqrt{3}$	1	(0.008 ~ 0.08)	∞
$u_c^2(P_0) = (0.125 \sim 0.32)^2$ $u_c(P_0) = (0.125 \sim 0.32)$ $\nu_{\text{eff}}(P_0) = \infty$ $U = 2 u_c(P_0) = (0.25 \sim 0.64)$					

B.4 频率测量示值的校准的不确定度分析

B.4.1 测量方法

被校矢量信号分析仪直接测量数字信号发生器的输出频率。图 B.4 是接线图。

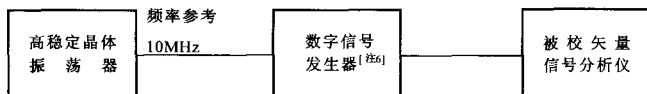


图 B.4 频率测量校准接线图

B.4.2 数学模型

$$f_X = f_N \quad (\text{B.12})$$

式中, f_N ——标准数字信号发生器输出频率值, Hz;

f_X ——被校矢量信号分析仪示值, Hz。

B.4.3 方差和灵敏系数

$$\begin{aligned} \text{依} \quad u_c^2(Y) &= \sum (\partial f / \partial X_i)^2 u^2(X_i) \\ \text{得} \quad u_c^2(f_X) &= c_1^2 u^2(f_N) \end{aligned} \quad (\text{B.13})$$

式中, $c_1 = 1$ 。

B.4.4 计算各分量标准不确定度

B.4.4.1 标准数字信号发生器输出频率引入的不确定度分量 $u(f_N)$, 由三个分量合成^[注6]。

B.4.4.1.1 频率参考老化率引入的不确定度分量 $u(f_{N1})$, 按均匀分布估算。频率参考老化率指标为 5×10^{-10} /日。假定高稳定晶体振荡器每年被调整到最佳状态, 365 天单方向漂移, 且不加修正^[注7], 则:

$$u(f_{N1}) = 5 \times 10^{-10} \times 365 / \sqrt{3} = 1.8 \times 10^{-7} / \sqrt{3}$$

B.4.4.1.2 温度系数引入的不确定度分量 $u(f_{N2})$, 按均匀分布估算。假设实验室温度控制允限为 $\pm 5^\circ\text{C}$, 即温度偏离 5°C , 则:

$$u(f_{N2}) = t \times 1 \times 10^{-10} / \sqrt{3} = 5 \times 10^{-10} / \sqrt{3}$$

B.4.4.1.3 电源电压不稳引入的不确定度分量 $u(f_{N3})$, 按电源允许变化 $\pm 10\%$ 的指标估算, 得到:

$$u(f_{N3}) = 1.0 \times 10^{-10} / \sqrt{3}$$

以上三项合成得到: $u(f_N) = 1.8 \times 10^{-7} / \sqrt{3}$ 。

B.4.4.2 整个测量系统不稳定性引入的不确定度, 用多次测量平均值的实验标准差估算。实验数据如下(测量点 100MHz, 下表只记录尾数)。

测量点: 100MHz

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
测量值 (Hz)	125	126	124	126	125	127	125	124	126	125

$$u(f_s) = 0.95\text{Hz}/100\text{MHz} = 9.5 \times 10^{-9}。$$

[注6] 还有一项：数字信号发生器的频率合成精度引入的不确定度，一般为 1×10^{-10} 数量级，可以忽略。

[注7] 如果调整时的测量不确定度与老化率引入的不确定度相比不是很小，不能忽略时，应予以考虑。

B.4.5 标准不确定度一览表（见表 B.4）

B.4.6 合成标准不确定度

数学模型中不包括 A 类评定，合成时加上。

$$u_c(f_x) = \sqrt{u^2(f_N) + u^2(f_s)} = 1.0 \times 10^{-7} (\text{相对 } 100\text{MHz})$$

B.4.7 有效自由度

$$\nu_{\text{eff}}(f_x) = \infty$$

B.4.8 扩展不确定度

$$\text{相对不确定度 } U_{0.95} = t_{0.95} u_c = 2u_c = 2.0 \times 10^{-7}$$

表 B.4 （测量点：100MHz；单位：相对值）

标准不确定度分量	不确定度来源	标准不确定度值	$c_i = \partial f / \partial X_i$	$u(Y) = c_i u(X_i)$	自由度
$u(f_N)$	标准器	$1.8 \times 10^{-7} / \sqrt{3}$			
$u(f_{N1})$	老化率	$1.8 \times 10^{-7} / \sqrt{3}$	1	1.0×10^{-7}	∞
$u(f_{N2})$	温度系数	$5 \times 10^{-10} / \sqrt{3}$	1		
$u(f_{N3})$	电源电压	$1.0 \times 10^{-10} / \sqrt{3}$	1		
$u(f_s)$	测量重复性	$9.5 \times 10^{-9} / 1$	1		
$u_c^2(f_x) = (1.0 \times 10^{-7})^2$ $u_c(f_x) = 1.0 \times 10^{-7}$ $\nu_{\text{eff}}(f_x) = \infty$ $U = 2u_c(f_x) = 2.0 \times 10^{-7} (\text{相对不确定度})$					

B.5 误差矢量幅度（EVM）测量的校准的不确定度分析

B.5.1 测量方法

把被校矢量信号分析仪和标准矢量信号分析仪通过功率分配器与数字信号发生器相连，同时测量矢量信号的各参量，分别得读数 N 和 N_0 ，如图 B.5 所示。校准时按式 (14) 计算被校矢量信号分析仪的测量误差：

$$\Delta N = N - N_0 \quad (\text{dB}) \quad (\text{B.14})$$

也就是 N_0 是 N 的约定真值。校准不确定度分析的目的是给出 N_0 的不确定度的估算值。

矢量信号分析仪测量数字调制参数时，并不象传统仪器测量 AM、FM、PM 那样用检波或鉴频的方法解调出低频信号，而是先经变频转换成（0 ~ 10MHz）的基带信号，再分离出 I 信号和 Q 信号，再把信号数字化，最后经数字滤波及计算得出各种参数的

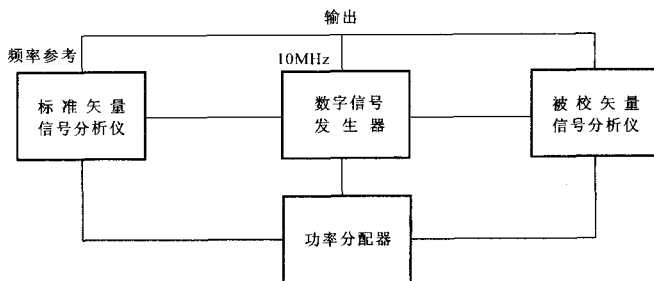


图 B.5 数字量测量接线图

测量结果。

在坐标平面 (I/Q 平面) 上用相应的点表示经数字调制后的矢量信号的瞬时值称之为坐标图 (或状态图), 如图 B.6。一个平面代表一个状态, 每点代表一个矢量。不同矢量代表逻辑量“0”或“1”。每两矢量代表 1 比特。由于 RF 放大器的非线性与噪声, 传输通道的干扰与衰落等, 使得矢量的幅度与相应产生变化, 因此测量到的矢量与参考矢量并不一样, 如图 B.7 所示。

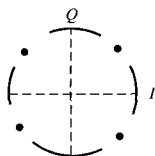


图 B.6 矢量坐标图

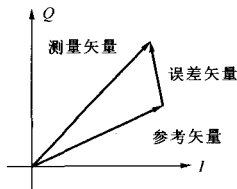


图 B.7 误差矢量图

从图 B.7 上, 我们很容易理解以下定义:

误差矢量: 等于测量到的矢量与参考矢量的矢量差。

误差矢量幅度 (EVM): 等于误差矢量的模值。

矢量幅度误差: 等于测量到的矢量的模值与参考矢量的模值之差。

相位误差: 等于测量到的矢量相角与参考矢量相角之差。

原点偏移: 等于测量到的矢量的原点与参考矢量的原点之差。

频率偏移: 等于测量到的矢量的瞬时频率与参考矢量的瞬时频率之差。

测量时, 矢量信号分析仪把测得的每个矢量与参考信号的对应矢量逐一比较, 求出差值。参考信号是由分析仪根据被测信号码型自动产生, 它是一个统计量。测量结果显示的是多次测量结果的平均值。被平均的数据的符号数目可以随意设定。测量结果通常表示为百分比峰值或百分比有效值。例如:

误差矢量幅度 = (误差矢量幅度/参考矢量峰值) × 100%

经分析, 数字量测量不确定度主要与以下因数有关:

标准矢量信号分析仪幅度测量非线性, 相位测量误差, 参考矢量幅度误差、参考矢量相位误差, 同步电路的抖动, 数字信号发生器输出矢量不稳定引入的误差等。

下面以安捷伦公司的 89441A 作为标准器进行分析。

B.5.2 数学模型

$$|N| = |N_0| = \frac{|V_x - V_N|}{V_p} \times 100\% \quad (\text{B.15})$$

式中, V_x ——标准矢量信号分析仪测得的矢量;

V_N ——标准矢量信号分析仪自动产生的参考矢量;

V_p ——标准矢量信号分析仪测得的参考矢量的峰值;

N_0 ——标准矢量信号分析仪测得的误差矢量;

N ——被校矢量信号分析仪测得的误差矢量。

B.5.3 计算各分量标准不确定度

设测量点为 0.5% (绝对值)。

B.5.3.1 标准矢量信号分析仪测量矢量信号幅度引入的不确定度 $u(V_x)$, 由以下 4 个分量合成。

B.5.3.1.1 标准矢量信号分析仪幅度测量非线性引入的不确定度 $u(V_{x1})$

用载波幅度测量非线性指标估算, 均匀分布, 包含因子为 $\sqrt{3}$:

$$u(V_{x1}) = 0.1\text{dB}/\sqrt{3} = 0.058\text{dB}, \text{即 } u(V_{x1}) = 1.16\%/\sqrt{3} \text{ (相对值)};$$

或 $u(V_{x1}) = 0.5\% \times 1.16\%/\sqrt{3} = 0.0056\%/\sqrt{3}$ (绝对值)。

B.5.3.1.2 相位测量误差引入的不确定度 $u(V_{x2})$

当 α 很小时, 相应的影响等于 $\sin\alpha$ 。用矢量信号分析仪的相位最小值 (0.17°) 指标估算, 均匀分布, 包含因子 $\sqrt{3}$:

$$u(V_{x2}) = \frac{\sin(0.17^\circ)}{2\sqrt{3}} = \frac{0.003}{2\sqrt{3}} = \frac{0.3\%}{2\sqrt{3}} \text{ (相对值)};$$

$$\text{或 } u(V_{x2}) = \frac{0.5\% \times 0.3\%}{2\sqrt{3}} = \frac{0.0015\%}{2\sqrt{3}} \text{ (绝对值)}。$$

B.5.3.1.3 最小测量值引入的不确定度分量 $u(V_{x3})$, 按均匀分布估算:

$$u(V_{x3}) = \frac{0.3\%}{2\sqrt{3}} \text{ (绝对值)}。$$

B.5.3.1.4 I/Q 原点偏移 (Origin Offset) 引入的不确定度分量 $u(V_{x4})$, 依最小指标估算:

$$u(V_{x4}) = \frac{0.3\%}{2\sqrt{3}} \text{ (相对值)};$$

$$\text{或 } u(V_{x4}) = \frac{0.5\% \times 0.3\%}{2\sqrt{3}} = \frac{0.0015\%}{2\sqrt{3}} \text{ (绝对值)}。$$

B.5.3.2 参考矢量幅度引入的不确定度 $u(V_N)$

用载波幅度测量非线性指标估算, 结果同第 5.3.1.1 条。 $u(V_N) = 0.0056\%/\sqrt{3}$ (绝对值)。

B.5.3.3 参考矢量峰值引入的不确定度 $u(V_P)$

用载波幅度测量非线性指标估算, 结果同第 5.3.1.1 条。 $u(V_P) = 0.0056\%/\sqrt{3}$ (绝对值)。

B.5.3.4 多次测量统计标准差 $u(N_S)$

下表中, $\Delta N = N - N_0$

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ΔN (%)	0.022	0.033	0.065	0.054	0.071	0.046	0.035	0.083	0.021	0.052

$u(N_S) = 0.028\%$ (绝对值)

B.5.4 标准不确定度一览表 (见表 B.5)

B.5.5 合成标准不确定度

$u_c =$

$$\sqrt{c_1^2 u^2(V_{X1}) + c_2^2 u^2(V_{X2}) + c_3^2 u^2(V_{X3}) + c_4^2 u^2(V_{X4}) + c_5^2 u^2(V_N) + c_6^2 u^2(V_P) + c_7^2 u^2(N_S)}$$

= 0.09% (绝对值)

B.5.6 有效自由度

$$\nu_{\text{eff}} = \infty$$

B.5.7 扩展不确定度

$$U_{0.95} = t_{0.95} \times u_c = 2u_c = 0.18\% \text{ (绝对值)}$$

表 B.5 (绝对值)

标准不确定度分量	不确定度来源	标准不确定度值	$c_i = \partial f / \partial X_i$	$u(Y) = c_i u(X_i)$	自由度
$u(V_X)$	矢量幅度测量	0.087%	1	0.087%	∞
$u(V_{X1})$	峰值功率	$0.5\% \times 1.16\%/\sqrt{3}$	1	0.0034%	
$u(V_{X2})$	相位误差	$0.5\% \times 0.3\%/(2\sqrt{3})$	1	0.00043%	
$u(V_{X3})$	最小测量值	$0.3\%/(2\sqrt{3})$	1	0.087%	
$u(V_{X4})$	I/O 原点偏移	$0.5\% \times 0.3\%(2\sqrt{3})$	1	0.00043%	
$u(V_N)$	参考矢量幅度	$0.5\% \times 1.16\%/\sqrt{3}$	1	0.0034%	∞
$u(V_P)$	参考矢量峰值	$0.5\% \times 1.16\%/\sqrt{3}$	1	0.0034%	∞
$u(N_S)$	测量重复性	0.028%/1	1	0.028%	9
$u_c^2(N) = (0.09\%)^2$ $u_c(N) = 0.09\%$ $\nu_{\text{eff}}(N) = 931$ $U = 2u_c(N) = 0.18\%$ (或相对不确定度: 36%, 相对于 0.5%)					

B.6 矢量幅度误差测量的校准的不确定度分析

B.6.1 测量方法

与第5节的“误差矢量幅度测量的校准的不确定度分析”相同。

B.6.2 数学模型

$$N = N_0 = \frac{|V_X| - |V_N|}{V_P} \times 100\% \quad (\text{B.16})$$

式中, $|V_X|$ ——标准矢量信号分析仪测得的矢量的幅度;

$|V_N|$ ——标准矢量信号分析仪产生的参考矢量的幅度;

V_P ——标准矢量信号分析仪产生的参考矢量的峰值;

N_0 ——标准矢量信号分析仪测得的矢量幅度误差值, %;

N ——被校矢量信号分析仪测得的矢量幅度误差值, %。

分析方法与误差矢量幅度相同, 结果相同。

B.7 I/Q 原点偏移 (Origin Offset) 测量的校准的不确定度分析

B.7.1 测量方法

与第5节的“误差矢量幅度测量的校准的不确定度分析”相同。

B.7.2 数学模型

原点偏移等于测量得到的矢量的原点与参考矢量的原点之差, 除以参考矢量的幅度。即,

$$N = N_0 = \frac{|V_X| - |V_N|}{V_P} \times 100\% \quad (\%) \quad (\text{B.17})$$

或

$$N = 20 \log \left(\frac{|V_X| - |V_N|}{V_P} \right) \quad (\text{dB}) \quad (\text{B.18})$$

式中, V_X ——标准矢量信号分析仪测得的矢量原点值;

V_N ——标准矢量信号分析仪测得的参考矢量原点值;

V_P ——标准矢量信号分析仪测得的参考矢量峰值;

N_0 ——标准矢量信号分析仪测得的原点偏移值, %, 或 dB;

N ——被校矢量信号分析仪测得的原点偏移值, %, 或 dB。

B.7.3 计算各分量标准不确定度

设测量点为 -46dB (绝对值) (等于 0.5%)。

B.7.3.1 测得矢量原点值引入的不确定度 $u(V_X)$

由载波幅度测量非线性指标估算, 均匀分布, 包含因子为 $\sqrt{3}$:

$$u(V_X) = 0.1\text{dB}/\sqrt{3}, \text{ 即 } u(V_X) = 1.16\%/\sqrt{3} \text{ (相对值);}$$

或 $u(V_X) = 0.5\% \times 1.16\%/\sqrt{3}$ (绝对值)。

B.7.3.2 参考矢量原点值引入的不确定度用载波幅度测量非线性指标估算, 均匀分布, 包含因子为 $\sqrt{3}$:

$$u(V_N) = 0.1\text{dB}/\sqrt{3}, \text{ 即 } u(V_N) = 1.16\%/\sqrt{3} \text{ (相对值);}$$

或 $u(V_N) = 0.5\% \times (1.16\%/\sqrt{3})$ (绝对值)。

B.7.3.3 矢量峰值测量引入的不确定度分量 $u(V_P)$

用矢量信号分析仪的载波幅度测量非线性指标估算, 按均匀分布, 包含因子为 $\sqrt{3}$:

$$u(V_P) = 0.1\text{dB}/\sqrt{3}, \text{即 } u(V_P) = 1.16\%/\sqrt{3} \text{ (相对值);}$$

或 $u(V_P) = 0.5\% \times (1.16\%/\sqrt{3})$ (绝对值)。

B.7.3.4 最小测量值引入的不确定度分量 $u(V_{\min})$

依据指标 (-56dB, 或 0.158%) 估算:

$$u(V_{\min}) = \frac{0.158\%}{2\sqrt{3}} \text{ (绝对值)}。$$

B.7.3.5 多次测量统计标准差 $u(N_S)$

下表中, $\Delta N = N - N_0$

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
ΔN (-dB)	0.9	0.6	0.4	0.8	0.5	0.7	0.9	0.6	0.3	0.7
ΔN (%)	10.92	7.15	9.71	9.64	5.93	8.39	10.92	7.15	3.51	8.39

$u(N_S) = 2.5\%$ (相对值);

$u(N_S) = 0.5\% \times 2.5\% = 0.0125\%$ (绝对值)。

B.7.4 标准不确定度一览表 (见表 B.6)

B.7.5 合成标准不确定度

$$u_c = \sqrt{c_1^2 u^2(V_X) + c_2^2 u^2(V_N) + c_3^2 u^2(V_P) + c_4^2 u^2(V_{\min}) + c_5^2 u^2(N_S)}$$

$$= 0.048\% \text{ (绝对值)}$$

B.7.6 有效自由度

$$\nu_{\text{eff}} = \infty$$

B.7.7 扩展不确定度

$$U_{0.95} = t_{0.95} \times u_c = 2u_c = 0.096\% \text{ (绝对值)}$$

表 B.6 (绝对值)

标准不确定度分量	不确定度来源	标准不确定度值	$c_i = \partial f / \partial X_i$	$u(Y) = c_i u(X_i)$	自由度
$u(V_X)$	信号矢量原点值	$0.5\% \times 1.16\%/\sqrt{3}$	1	0.0034%	∞
$u(V_N)$	参考矢量原点值	$0.5\% \times 1.16\%/\sqrt{3}$	1	0.0034%	∞
$u(V_P)$	参考矢量峰值	$0.5\% \times 1.16\%/\sqrt{3}$	1	0.0034%	∞
$u(V_{\min})$	最小测量值	$0.158\%/(2\sqrt{3})$	1	0.046%	∞
$u(N_S)$	测量重复性	0.0125%/1	1	0.0125%	9
$u_c^2(N) = (0.048\%)^2$ $u_c(N) = 0.048\%$ $\nu_{\text{eff}}(N) = \infty$ $U = 2u_c(N) = 0.096\%$; 或相对不确定度: 19% (1.5dB), 相对于 0.5% (-46dB)					

B.8 相位误差测量的校准的不确定度分析

B.8.1 测量方法

与第5节的“误差矢量幅度测量的校准的不确定度分析”相同。

B.8.2 数学模型

$$P_X = P_N \quad (\text{B.19})$$

式中, P_N ——标准矢量信号分析仪测量得到的相位误差值;

P_X ——被校仪器的测量示值。

B.8.3 计算各分量标准不确定度

设测量点为 0.26° 。

B.8.3.1 标准矢量信号分析仪测量相位误差值引入的不确定度分量 $u(P_N)$ 。

用最小测量值估算。标准矢量信号分析仪测量相位误差最小值指标为 0.17° 。按均匀分布有: $u(P_N) = \frac{0.17}{2\sqrt{3}}(^\circ)$ 。

B.8.3.2 多次测量平均值的实验标准差 $u(P_S)$

下表中, $\Delta = P - P_N$

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$\Delta (^\circ)$	0.08	0.09	0.10	0.07	0.06	0.01	0.04	0.02	0.06	0.05

$$u(P_S) = 0.029^\circ$$

B.8.4 标准不确定度一览表 (见表 B.7)

B.8.5 合成标准不确定度

$$u_c = \sqrt{c_1^2 u^2(P_N) + c_2^2 u^2(P_S)} = 0.06^\circ$$

B.8.6 有效自由度

$$\nu_{\text{eff}} = \infty$$

B.8.7 扩展不确定度

$$U_{0.95} = t_{0.95} u_c = 2u_c = 0.12^\circ$$

表 B.7 ($^\circ$)

标准不确定度分量	不确定度来源	标准不确定度值	$c_i = \partial f / \partial X_i$	$u(Y) = c_i u(X_i)$	自由度
$u(P_N)$	标准器/最小值	$0.17/(2\sqrt{3})$	1	0.049	∞
$u(P_S)$	测量重复性	0.029/1	1	0.029	9
$u_c^2(P_X) = (0.06)^\circ^2$ $u_c(P_X) = 0.06(^\circ)$ $\nu_{\text{eff}}(P_X) = 133$ $U = 2u_c(P_X) = 0.12(^\circ)$					