



中华人民共和国国家计量技术规范

JJF1463-202*

无源互调测试仪校准规范

Calibration Specification for Passive Intermodulation Analyzers

(征求意见稿)

xxxx-xx-xx 发布

xxxx-xx-xx 实施

国家市场监督管理总局 发布

无源互调测试仪校准规范

Calibration Specification for Passive

Intermodulation Analyzers

JJF1463-202* 代替

JJF 1463-2014

归口单位：全国无线电计量技术委员会

主要起草单位：上海市计量测试技术研究院

中国计量科学研究院

中国科学院上海高等研究院

参加起草单位：镇江市澳华测控技术有限公司

中国信息通信研究院

江苏省计量科学研究院

本规范由全国无线电计量技术委员会负责解释

本规范主要起草人：

xxx （上海市计量测试技术研究院）

xxx （中国计量科学研究院）

xxx （中国科学院上海高等研究院）

参加起草人：

xxx （镇江市澳华测控技术有限公司）

xxx （上海市计量测试技术研究院）

xxx （中国信息通信研究院）

xxx （江苏省计量科学研究院）

目 录

引言	II
1 范围	1
2 引用文件	1
3 术语和计量单位	1
4 概述	1
5 计量特性	1
5.1 输出频率	1
5.2 输出功率	1
5.3 无源互调测量	2
6 校准条件	2
6.1 环境条件	2
6.2 校准用设备	2
7 校准项目和校准方法	3
7.1 外观及工作正常性检查	3
7.2 输出频率	3
7.3 输出功率	4
7.4 接收机平均底噪	6
7.5 剩余无源互调	6
7.6 无源互调测量	6
8 校准结果	7
9 复校时间间隔	8
附录 A 原始记录格式	9
附录 B 校准证书内页格式	14
附录 C 不确定度评定实例	18

引 言

本校准规范的编制依据：《JJF 1071-2010 国家计量校准规范编写规则》，《GB/T 21021-2021/IEC 62037-1:2012 无源射频和微波元器件的互调电平测量 第一部分：一般要求和测量方法》。

本规范是《JJF 1463-2014 无源互调测试仪校准规范》的修订。与 JJF 1463-2014 相比，主要变化如下：

- 频率上限从 3.5GHz 扩展至 6GHz；
- 输出功率上限从 48dBm 扩展至 49dBm；
- 输出频率最大允许误差从 $\pm 5 \times 10^{-6}$ 修改为 $\pm 1 \times 10^{-6}$ ；
- 输出功率最大允许误差从 $\pm 0.35\text{dB}$ 修订为 $\pm 0.30\text{dB}$ ；
- 无源互调测量阶数从 3 阶扩展至多阶。

—修订了以下参数名称：将传输无源互调修订为正向无源互调、反射无源互调修订为反向无源互调、反射剩余无源互调修订为剩余反向无源互调、传输剩余无源互调修订为剩余正向无源互调。

本规范历次版本发布情况：

- JJF 1463-2014。

无源互调测试仪校准规范

1 范围

本校准规范适用于频率范围为 700MHz~6GHz 的无源互调测试仪的校准，其他无源互调测试仪的校准可以参照本规范执行。

2 引用文件

GB/T 21021-2021 无源射频和微波元器件的互调电平测量 第一部分：一般要求和测量方法。

使用本规范时，应注意使用上述引用文献的现行有效版本。

3 术语和计量单位

3.1 无源互调

无源互调是由多种未知的特性、位置和状态的非线性所导致的，例如金属间的接触、材料的选择、腐蚀产物、污渍等。

4 概述

无源互调测试仪主要由 2 台高功率信号源、2 台传输滤波器、1 台合路器和双工器、接收滤波器、负载和接收机等组成。通常无源互调测试仪具有两个测试端口，其中之一为反向端口，用于测量器件的反向互调；另一个为正向端口，用于测量器件的正向互调。

无源互调是数字通信中无源大功率器件的一个重要参数，无源互调是两个或者以上的信号经过无源器件比如合路器、耦合腔、天线、馈线、定向耦合器等所产生的互调分量。无源互调分为 2 阶、3 阶、5 阶、7 阶、9 阶等，但主要是 3 阶无源互调影响最大。无源互调包括反向无源互调和正向无源互调。

5 计量特性

5.1 输出频率

范围：700MHz~6GHz

最大允许误差： $\pm 1 \times 10^{-6}$

5.2 输出功率

范围：(20~49) dBm

最大允许误差： ± 0.30 dB

5.3 无源互调测量

电平范围：-70dBm~-122dBm (700MHz~6GHz)

最大允许误差： ± 1 dB/(-70~-120) dBm

5.4 接收机平均底噪：小于-140dBm。

5.5 剩余无源互调（输入功率 2×43 dBm）

剩余反向无源互调：小于-122dBm

剩余正向无源互调：小于-120dBm

注：以上技术指标不作合格性判别，仅提供参考。

6 校准条件

6.1 环境条件

- 6.1.1 环境温度：23℃±5℃
- 6.1.2 相对湿度：20%~80%
- 6.1.3 电源电压及频率：220（1±10%）V、（50±1）Hz
- 6.1.4 周围无影响仪器正常工作的电磁干扰和机械振动。

6.2 校准用设备

6.2.1 功率计

- 频率范围：10MHz~6GHz
- 连续波功率测量范围：-60dBm~20dBm
- 参考功率测量最大允许误差：±2%
- 功率测量线性：±3%

6.2.2 频率计

- 频率范围：10Hz~6GHz
- 频率最大允许误差：±1×10⁻⁷

6.2.3 信号发生器

- 输出频率范围：10MHz~6GHz
- 输出频率最大允许误差：±1×10⁻⁷
- 输出功率范围：(-130~0) dBm
- 输出功率最大允许误差：±1.0dB

6.2.4 频谱分析仪

- 频率范围：10kHz~6GHz
- 内部时基频率最大允许误差：±1×10⁻⁷
- 电平测量范围：(-130~30) dBm

6.2.5 测量接收机

- 频率范围 100kHz~6GHz
- 电平测量范围：(-127~10) dBm
- 电平测量最大允许误差：±(0.13dB+0.005dB/10dB×读数)

6.2.6 衰减器

- 频率范围：500MHz~6GHz
- 最大允许输入功率：100W
- 衰减值：30dB
- 衰减溯源不确定度：优于 0.10dB（k=2）
- 电压驻波比：小于 1.2

6.2.7 低无源互调电缆

- 频率范围：700MHz~6GHz
- 无源互调测量值：小于-123dBm（输入功率 2×43dBm）

7 校准项目和校准方法

校准项目见表 2。

表 2 校准项目表

序号	项目名称
----	------

1	外观及工作正常性检查
2	输出频率
3	输出功率
4	无源互调测量
5	接收机平均底噪
6	剩余无源互调

7.1 外观及工作正常性检查

7.1.1 无源互调测试仪应有说明书及全部配套附件。

7.1.2 无源互调测试仪各开关、按键等应安装牢固，调节正常。仪器不应有影响电气性能的机械损伤。仪器反向端和正向端的射频接头端面应无损伤、无松动、接口螺纹纹路正常、内外芯无污损、内芯之间接触面良好。将结果记录于附录 A 表 A.1 中。

7.1.3 校准之前，仪器应按照仪器说明书要求预热。

7.2 输出频率

7.2.1 两个信号发生器输出可以单独打开及关闭。

a) 仪器连接如图 1 所示。

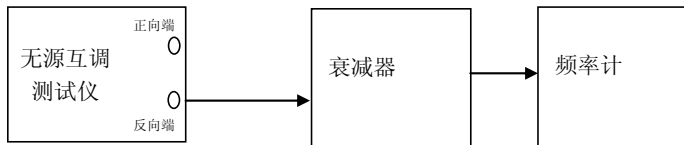


图 1 输出频率校准框图（两个信号发生器输出可以单独打开及关闭）

b) 将无源互调测试仪的输出使用低无源互调测试电缆连接到衰减器，衰减器的输出连接到频率计。

c) 无源互调测试仪设定为点频工作模式，两个信号发生器输出功率偏置（offset）设置为 0dB。

d) 无源互调测试仪第一个信号发生器输出功率设定为 30dBm，频率为其频率下限 f_1 ；第二个信号发生器不输出信号。

e) 合理设置频率计的频率分辨力，读取频率计指示值并记录于附录 A 表 A.2 中。

f) 改变第一个信号发生器输出频率，其余不变，读取频率计的数值，直至其频率上限 f_2 。

g) 无源互调测试仪第二个信号发生器输出功率设定为 30dBm，频率为其频率下限 f_3 ；第一个信号发生器不输出信号。

h) 合理设置频率计频率分辨力，读取频率计指示值，并记录于附录 A 表 A.2 中。

i) 改变第二个信号发生器输出频率，其余不变，读取频率计指示值，直至达到频率上限 f_4 。

7.2.2 两个信号发生器的输出不可以单独打开及关闭。

a) 仪器连接如图 2 所示。

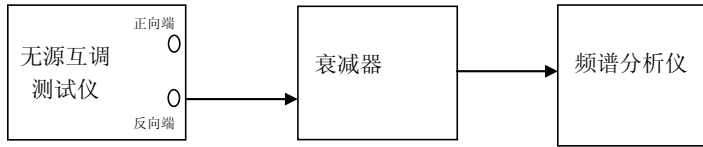


图2 输出频率校准框图（两个信号发生器输出不可以单独打开及关闭）

b) 将无源互调测试仪的输出使用低无源互调测试电缆连接到衰减器，衰减器的输出连接至频谱分析仪。

c) 设定无源互调测试仪两个信号发生器的输出功率均为 30dBm，两个信号发生器输出功率偏置（offset）设置为 0dB，第一个信号发生器的频率设定为其频率下限 f_1 ，第二个信号发生器的频率设定为其频率下限 f_3 。

d) 频谱分析仪的中心频率先设定为 f_1 ，扫描宽度为 10kHz，参考电平为 20dBm，其余自动，如频谱分析仪具有频率计数（counter）测量功能，则用频率计数功能测量信号频率；如果该频谱分析仪不具有频率计数功能，则使用频率读数功能测量该信号频率；读取频谱分析仪的频率测量结果并记录于附录 A 表 A.2 中；再设定频谱分析仪的中心频率为 f_3 ，其余设置不变，测量信号频率，并记录于附录 A 表 A.2 中。

e) 设定无源互调测试仪第一个信号发生器输出频率为其频率上限 f_2 ，第二个信号发生器的输出频率为其频率上限 f_4 。

f) 依次设定频谱分析仪的中心频率为 f_2 及 f_4 ，其余不变，测量信号频率，并记录于附录 A 表 A.2 中。

7.3 输出功率

7.3.1 两个信号发生器输出可以单独打开及关闭。

a) 仪器连接如图 3 所示。

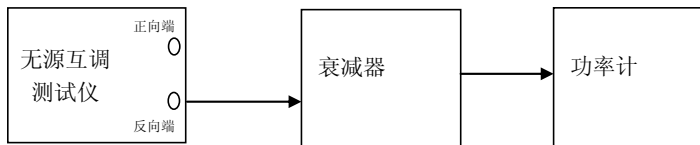


图3 输出功率校准框图（两个信号发生器输出可以单独打开及关闭）

b) 将无源互调测试仪的输出使用低无源互调测试电缆连接到衰减器，将衰减器的输出接至功率计。

c) 无源互调测试仪设定为点频工作模式，两个信号发生器输出功率偏置（offset）设置为 0dB；关闭第二个信号发生器输出；设定第一个信号发生器的频率为其频率下限 f_1 ，设定输出功率为 20dBm 或最小值。

d) 根据测试功率的频率设定功率计的校准因子，读取功率计的指示值 P (dBm)，并记录于附录 A 表 A.3 中。

根据式 (1) 计算输出功率：

$$P_s = P + A \quad (1)$$

式 (1) 中：

P_s —输出功率，dBm；

P —功率计读数，dBm；

A—衰减器衰减值, dB。

e) 改变无源互调测试仪第一个信号发生器输出功率值, 重复步骤 3) ~4), 直至最高输出功率。

f) 改变第一个信号发生器的输出频率, 重复步骤 3) ~5)。

g) 关闭第一个信号发生器输出; 设定第二个信号发生器的频率为 f_3 , 设定输出功率为 20dBm 或最小值。

h) 根据测试功率的频率设定功率计的校准因子, 读取功率计的指示值 P (dBm), 并记录于附录 A 表 A.3 中, 根据式 (1) 计算输出功率。

i) 改变无源互调测试仪第二个信号发生器输出功率值, 重复步骤 g) ~h), 直至最高输出功率。

j) 改变第二个信号发生器的输出频率, 重复步骤 g) ~i)。

7.3.2 两个信号发生器输出不可以单独打开及关闭。

首先使用信号发生器和测量接收机对频谱分析仪 f_1 、 f_2 、 f_3 和 f_4 频率点处的电平测量准确度进行校准。校准时, 设定频谱分析仪扫描宽度为 10kHz, 参考电平为 20dBm, 其余自动; 得出其以上频率点处的电平测量修正值 C (dB)。

a) 仪器连接如图 2 所示。

b) 无源互调测试仪设定为点频工作模式, 设定无源互调测试仪的两个信号发生器的输出功率为 20dBm 或最小值, 两个信号发生器输出功率偏置 (offset) 设置为 0dB, 第一个信号发生器的输出频率为 f_1 , 第二个信号发生器的输出频率为 f_3 。

c) 将无源互调测试仪的输出使用低无源互调测试电缆连接到衰减器, 衰减器的输出连接至频谱分析仪, 设定频谱分析仪的中心频率为 f_1 , 其余设定与前面频谱分析仪电平测量准确度校准时的设定一致, 使用频谱分析仪的峰值 (peak) 测量功能, 读取频谱分析仪功率测量值, 并记录于附录 A 表 A.4 中。

使用式 (2) 计算输出功率:

$$P_s = P + A + C \quad (2)$$

式 (2) 中:

P_s ——输出功率, dBm;

P ——频谱分析仪功率测量值, dBm;

A ——衰减器衰减值, dB;

C ——频谱分析仪电平测量修正值。

d) 根据附录 A 表 A.4 中的功率值改变无源互调测试仪的第一个信号发生器的输出功率, 读取频谱分析仪功率测量值, 记录于附录 A 表 A.4 中, 并使用式 (2) 计算输出功率, 直至功率最大值。

e) 将频谱分析仪的中心频率设定为 f_3 , 其余设定与前面频谱分析仪电平测量校准时的设定一致, 使用频谱分析仪的峰值 (peak) 测量功能, 读取频谱分析仪功率测量值, 并记录于附录 A 表 A.4 中。

f) 根据附录 A 表 A.4 中的功率值改变无源互调测试仪的第二个信号发生器的输出功率, 读取频谱分析仪功率测量值, 并记录于附录 A 表 A.4 中, 并使用式 (2) 计算输出功率, 直至功率最大值。

g) 设定无源互调测试仪第一个信号发生器输出频率为 f_2 , 第二个信号发生器的输出频率为 f_4 , 设定输出功率为 20dBm 或最小输出值。

h) 设定频谱分析仪的中心频率为 f_2 , 其他不变, 读取频谱分析仪功率测量值, 记录于附录 A 表 A.4 中, 并使用式 (2) 计算输出功率。

i) 根据附录 A 表 A.4 中的功率值改变无源互调测试仪的第一个信号发生器的输出功率, 读取频谱分析仪功率测量值, 并记录于附录 A 表 A.4 中, 并使用式 (2) 计算输出功率, 直至功率最大值。

j) 根据附录 A 表 A.4 中的功率值改变无源互调测试仪的第二个信号发生器的输出功率, 设定频谱分析仪的中心频率为 f_4 , 其他不变, 读取频谱分析仪功率测量值, 并记录于附录 A 表 A.4 中, 并使用式 (2) 计算输出功率, 直至功率最大值。

7.4 无源互调测量

7.4.1 反向无源互调测量

a) 仪表连接如图 4 所示, 将信号发生器的输出经衰减器连接至无源互调测试仪的反向端。

b) 无源互调测试仪设定为点频工作模式, 选择反向无源互调测量。

c) 关闭两路信号的输出, 设定无源互调测试第一个信号发生器频率为 f_1 , 设定第二个信号发生器的频率为 f_4 , 选择需要测量的互调阶数, 使所产生的无源互调频率范围位于其接收频率范围的最低端 f_L 。



图 4 反向无源互调测量校准框图

d) 设定信号发生器的输出频率为 f_L 。

e) 调整信号发生器输出功率, 使衰减器的输出端输出功率为 -70dBm 。

f) 从无源互调测试仪中读取无源互调测试值 (dBm), 将结果记录于附录 A 表 A.5 中。

g) 按附录 A 表 A.5 的标准值调整信号发生器的输出功率, 记录测量结果。

h) 改变无源互调测试仪第一个信号发生器的输出频率, 同时改变无源互调测试仪第二个信号发生的输出频率, 使其产生的无源互调频率为接收机所能测量的上限频率 f_H 。

i) 改变信号发生器的输出频率至无源互调测试仪的频率上限 f_H , 重复步骤 e) ~g)。

7.4.2 正向无源互调测量

a) 仪表连接如图 5 所示, 将信号发生器的输出信号经衰减器接至无源互调测试仪的传输端。

b) 无源互调测试仪设定为点频工作模式, 选择正向无源互调测量。

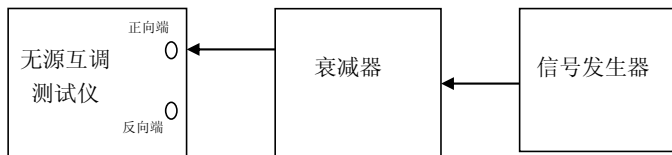


图 5 正向无源互调测量校准框图

c) 重复 7.4.1 的步骤 3) ~9)。

7.5 接收机平均底噪

a) 仪器连接如图 6 所示。



图 6 接收机平均底噪校准框图

b) 无源互调测试仪设定为扫频模式，关闭两路输出信号的输出，设定无源互调测试仪第一个信号发生器频率为 f_1 ，设定第二个信号发生器的频率为 f_4 ，选择所需要的无源互调阶数。

c) 从无源互调测试仪上读取接收机平均底噪 (dBm)，将结果记录于附录 A 表 A.6 中。

7.6 剩余无源互调

7.6.1 剩余反向无源互调

1) 仪器连接如图 6 所示。

2) 无源互调测试仪设定为扫频模式，设定无源互调测试仪第一个信号发生器频率为 f_1 、第二个信号发生器的频率为 f_4 ，设定两路信号的输出功率均为厂家规定的功率值（典型值为 43dBm），选择需要测量的无源互调阶数，打开两路信号的输出。

3) 从无源互调测试仪上读取剩余反向无源互调 (dBc)，并将结果记录于附录 A 表 A.7 中。

7.6.2 剩余正向无源互调

1) 仪器连接如图 7 所示。

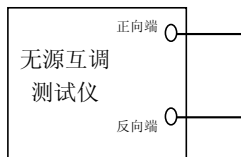


图 7 剩余正向无源互调校准框图

2) 无源互调测试仪设定为扫频模式，设定无源互调测试仪第一个信号发生器频率为 f_1 、第二个信号发生器的频率为 f_4 ，设定两路信号的输出功率均为厂家规定的功率值（典型值为 43dBm），选择需要测量的无源互调阶数，打开两路信号的输出。

3) 从无源互调测试仪上读取剩余正向无源互调 (dBc)，并将结果记录于附录 A 表 A.7 中。

8 校准结果

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

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

原始记录表格

表 A.1 外观及工作正常性检查

项目	检查结果

表 A.2 输出频率

信号发 生器	标称值/ MHz	实测值/ MHz	不确定度 ($k=2$)
1	f_1		
	f_2		
2	f_3		
	f_4		

表 A.3 输出功率（两个信号发生器可以单独打开及关闭）

信号发 生器	频率/ MHz	标称值/ dBm	功率计读数 P /dBm	衰减器 衰减值 A /dB	实测值 P_s /dBm	不确定度 ($k=2$)
1	f_1	20				
		30				
		33				
		35				
		40				
		41				

2	f_2	42				
		43				
		最大值				
		20				
		30				
		33				
		35				
		40				
		41				
		42				
		43				
	最大值					
	f_3	20				
	30					
	33					
	35					
	40					
	41					
	42					
	43					
	最大值					
f_4	20					
30						
33						
35						
40						
41						
42						
43						
最大值						

表 A.4 输出功率（两个信号发生器不可以单独打开及关闭）

信号发 生器	频率/ MHz	标称值/ dBm	频谱分析 仪读数 P /dBm	衰减器 衰减值 A /dB	频谱分析 仪修正值 C /dB	实测值 P_s /dBm	不确定度 ($k=2$)
-----------	------------	-------------	-------------------------	-----------------------	-------------------------	-------------------	-------------------

1	f_1	20					
		30					
		33					
		35					
		40					
		41					
		42					
		43					
		最大值					
	f_2	20					
		33					
		35					
		40					
		41					
		42					
		43					
		最大值					
2		f_3	20				
	30						
	33						
	35						
	40						
	41						
	42						
	43						
	最大值						
	f_4	20					
		30					
		33					
		35					
		40					
		41					
		42					
		43					
		最大值					

表 A.5 无源互调测量

1) 反向无源互调测量

频率/ MHz	标准值/ dBm	指示值/ dBm	不确定度 ($k=2$)
f_L	-70.00		
	-80.00		
	-90.00		
	-100.00		
	-110.00		
	-120.00		
	-130.00		
	-140.00		
f_H	-70.00		
	-80.00		
	-90.00		
	-100.00		
	-110.00		
	-120.00		
	-130.00		
	-140.00		

2) 正向无源互调测量

频率/ MHz	标准值/ dBm	指示值/ dBm	不确定度 ($k=2$)
f_L	-70.00		
	-80.00		
	-90.00		
	-100.00		
	-110.00		
	-120.00		
	-130.00		
	-140.00		

f_H	-70.00		
	-80.00		
	-90.00		
	-100.00		
	-110.00		
	-120.00		
	-130.00		
	-140.00		

表 A.6 接收机平均底噪

频率/ MHz	平均底噪/ dBm	不确定度 ($k=2$)

表 A.7 剩余无源互调

类型	实测值/ dBc	不确定度 ($k=2$)
剩余反向无源互调		
剩余正向无源互调		

附录 B

校准证书内页格式

表 B.1 输出频率

信号发生器	标称值/ MHz	实测值/ MHz	不确定度 ($k=2$)
1	f_1		
	f_2		
2	f_3		
	f_4		

表 B.2 输出功率

信号发生器	频率/ MHz	标称值/ dBm	实测值/ dBm	不确定度 ($k=2$)
1	f_1	20		
		30		
		33		
		35		
		40		
		41		
		42		
		43		
		最大值		
	f_2	20		
		30		
		33		
		35		

2		40			
		41			
		42			
		43			
		最大值			
	f_3	20			
		30			
		33			
		35			
		40			
		41			
		42			
		43			
		最大值			
		f_4	20		
			30		
			33		
			35		
			40		
41					
42					
43					
最大值					

表 B.3 无源互调测量

1) 反向无源互调测量

频率/ MHz	标准值/ dBm	指示值/ dBm	不确定度 ($k=2$)
f_L	-70.00		
	-80.00		
	-90.00		
	-100.00		
	-110.00		
	-120.00		

	-130.00		
	-140.00		
f_H	-70.00		
	-80.00		
	-90.00		
	-100.00		
	-110.00		
	-120.00		
	-130.00		
	-140.00		

2) 正向无源互调测量

频率/ MHz	标准值/ dBm	指示值/ dBm	不确定度 ($k=2$)
f_L	-70.00		
	-80.00		
	-90.00		
	-100.00		
	-110.00		
	-120.00		
	-130.00		
	-140.00		
f_H	-70.00		
	-80.00		
	-90.00		
	-100.00		
	-110.00		
	-120.00		
	-130.00		
	-140.00		

表 B.4 接收机平均底噪

频率/	平均底噪/	不确定度
-----	-------	------

JJF1463—20**

MHz	dBm	($k=2$)

表 B.5 剩余无源互调

类型	实测值/ dBc	不确定度 ($k=2$)
剩余反向无源互调		
剩余正向无源互调		

附录 C

主要项目校准结果不确定度评定实例

C.1 输出频率测量不确定度（使用频率计）

C.1.1 不确定度来源

- 1) 频率计频率测量最大允许误差引入的标准不确定度 u_1
- 2) 频率计显示分辨力引入的标准不确定度 u_2
- 3) 测量重复性引入的标准不确定度 u_3

C.1.2 不确定度分析

- 1) 频率计频率测量最大允许误差引入的标准不确定度 u_1

频率计频率测量最大允许误差为 $\pm 1 \times 10^{-7}$ ，即 $a_1 = 1 \times 10^{-7}$ ，设测量值落在该区间内的概率分布为均匀分布， $k = \sqrt{3}$

$$\text{标准不确定度 } u_1 = a_1 / k = 1 \times 10^{-7} / \sqrt{3} = 5.8 \times 10^{-8}$$

- 2) 频率计显示分辨力引入的标准不确定度 u_2

频率计显示分辨力为 1×10^{-10} ，即 $a_2 = 5 \times 10^{-11}$ ，设测量值落在该区间内的概率分布为均匀分布， $k = \sqrt{3}$

标准不确定度

$$u_2 = a_2 / k = 5 \times 10^{-11} / \sqrt{3} = 2.9 \times 10^{-11}$$

- 3) 测量重复性引入的标准不确定度 u_3

进行 10 次重复性条件测量，得到实验标准差

$$s = 1 \times 10^{-10}$$

标准不确定度

$$u_3 = 1 \times 10^{-10}$$

C.1.3 不确定合成

表 C.1 输出频率测量不确定度分量综合表

序号	不确定度分量					
	不确定度来源	类型	符号及数值	分布	包含因子	标准不确定度符号及数值
1	频率计频率测量最大允许误差	B	$a_1 = 1 \times 10^{-7}$	均匀	$\sqrt{3}$	$u_1 = 5.8 \times 10^{-8}$
2	频率计显示分辨力	B	$a_2 = 5 \times 10^{-11}$	均匀	$\sqrt{3}$	$u_2 = 2.9 \times 10^{-11}$
3	测量重复性	A	1×10^{-10}	/	/	$u_3 = 1 \times 10^{-10}$

以上各分量之间独立，合成标准不确定度：

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^3 u_i^2} = 5.8 \times 10^{-8}$$

C.1.4 扩展不确定度

包含因子取 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U_{rel} = k \times u_c = 2 \times 5.8 \times 10^{-8} = 1.2 \times 10^{-7}$$

C.2 输出频率测量不确定度（使用频谱分析仪）

C.2.1 不确定度来源

- 1) 频谱分析仪频率计功能频率测量最大允许误差引入的标准不确定度 u_1
- 2) 频谱分析仪频率计功能显示分辨力引入的标准不确定度 u_2
- 3) 频谱分析仪频率计功能测量重复性引入的标准不确定度 u_3

C.2.2 不确定度分析

- 1) 频谱分析仪频率计功能频率测量最大允许误差引入的标准不确定度 u_1

频谱分析仪频率计功能频率测量最大允许误差计算公式为：

频率测量最大允许误差 = \pm （频谱分析仪内部时基频率准确度 \times 频率读数 + 0.1Hz）

假设测量的频率为 900MHz，则

$$\text{频率测量最大允许误差} = \pm (1 \times 10^{-7} \times 900 \times 10^6 \text{Hz} + 0.1 \text{Hz}) = \pm 90.1 \text{Hz}$$

换算成相对值表示，对于 900MHz 频率，得到

$$a_1 = 90.1 \text{Hz} / (900 \times 10^7 \text{Hz}) = 1.001 \times 10^{-7}$$

设测量值落在该区间内的概率分布为均匀分布， $k=\sqrt{3}$

$$\text{标准不确定度 } u_1 = a_1 / k = 1.001 \times 10^{-7} / \sqrt{3} = 5.78 \times 10^{-8}$$

- 2) 频谱分析仪频率计功能显示分辨力引入的标准不确定度 u_2

频谱分析仪频率计功能显示分辨力为 0.1Hz，对应于 900MHz 的频率其分辨力

$$a_2 = 5.56 \times 10^{-11}，\text{设测量值落在该区间内的概率分布为均匀分布，} k=\sqrt{3}$$

标准不确定度

$$u_2 = a_2 / k = 5.56 \times 10^{-10} / \sqrt{3} = 3.21 \times 10^{-11}$$

- 3) 频谱分析仪频率计功能读数重复性引入的标准不确定度 u_3

进行 10 次重复性条件测量，得到实验标准差

$$s = 1.02 \times 10^{-10}$$

则标准不确定度为：

$$u_3 = 1.02 \times 10^{-10}$$

C.2.3 不确定合成

表 C.2 输出频率测量不确定度分量综合表

序号	不确定度分量					
	不确定度来源	类型	符号及数值	分布	包含因子	标准不确定度符号及数值
1	频率测量最大允许误差	B	$a_1=1.001 \times 10^{-7}$	均匀	$\sqrt{3}$	$u_1=5.78 \times 10^{-8}$
2	显示分辨力	B	$a_2=5.56 \times 10^{-11}$	均匀	$\sqrt{3}$	$u_2=3.21 \times 10^{-11}$
3	测量重复性	A	1.02×10^{-10}	/	/	$u_3=1.02 \times 10^{-10}$

以上各分量之间独立不相关，
合成标准不确定度：

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^3 u_i^2} = 5.8 \times 10^{-8}$$

C.2.4 扩展不确定度

包含因子 $k=2$ ，扩展不确定度为：

$$U_{rel} = k \times u_c = 2 \times 5.8 \times 10^{-8} = 1.2 \times 10^{-7}$$

C.3 输出功率测量不确定度

根据规范 7.3.1 中的校准方法，所用标准器为功率计和衰减器。

C.3.1 测量模型

根据规范中给出的校准方法，得到测量模型为

$$P_s = P + A \quad (\text{C.1})$$

式 (C.1) 中：

P_s —输出功率，dBm；

P —功率计读数，dBm；

A —衰减器衰减值，dB。

C.3.2 不确定度来源

经过分析，不确定度来源如下：

- 1) 功率指示器参考功率最大允许误差引入的标准不确定度 u_1
- 2) 功率传感器校准因子溯源引入的标准不确定度 u_2
- 3) 功率传感器线性引入的标准不确定度 u_3
- 4) 无源互调测试仪输出端与衰减器输入端失配引入的标准不确定度 u_4
- 5) 衰减器输出端与功率传感器输入端失配引入的标准不确定度 u_5
- 6) 热效应引起的衰减器衰减值改变引入的标准不确定度 u_6
- 7) 衰减器衰减值溯源引入的标准不确定度 u_7
- 8) 测量重复性引入的标准不确定度 u_8

C.3.3 不确定度分析

- 1) 功率指示器参考功率最大允许误差引入的标准不确定度 u_1

功率计参考功率电平最大允许误差为 $\pm 1\%$ ，转化成 dB 表示为 $\pm 0.043\text{dB}$ ，即 $a_1=0.043\text{dB}$ ，设测量值落在该区间内的分布类型为均匀分布， $k=\sqrt{3}$ ，标准不确定度

$$u_1 = a_1/k = 0.025\text{dB}$$

- 2) 功率传感器校准因子溯源引入的标准不确定度 u_2

根据功率传感器的溯源证书，功率传感器校准因子溯源的扩展不确定度为 2.0% ($k=2$)，转换为 dB 表示为 0.086dB，则其标准不确定度

$$u_2 = 0.086\text{dB}/2 = 0.043\text{dB}$$

- 3) 功率传感器线性引入的标准不确定度 u_3

功率传感器线性最大允许误差为 $\pm 3\%$ ，转换为 dB 表示为 0.128dB，即 $a_3=0.128\text{dB}$ ，设测量值落在该区间内的分布类型为均匀分布， $k=\sqrt{3}$ ，标准不确定度

$$u_3 = 0.074\text{dB}$$

4) 无源互调测试仪输出端与衰减器输入端间失配误差引入的标准不确定度 u_4

无源互调测试仪输出端电压驻波比 ≤ 1.2

衰减器输出端电压驻波比 ≤ 1.2

失配误差极限用下式估计:

$$\Delta_{p1} = 4.34 \times 2 \times |\Gamma_{S1}| |\Gamma_{U1}|$$

式中, Δ_{p1} —失配误差极限值, dB;

Γ_{S1} —无源互调测试仪输出端反射系数, 无量纲;

Γ_{U1} —衰减器输入端反射系数, 无量纲。

根据前面给出的技术指标得到:

$$|\Gamma_{S1}| = (1.2-1) / (1.2+1) = 0.091$$

$$|\Gamma_{U1}| = (1.2-1) / (1.2+1) = 0.091$$

$$\Delta_{p1} = 4.34 \times 2 \times |\Gamma_{S1}| |\Gamma_{U1}| = 0.072 \text{ dB}$$

所以 $a_4 = 0.072 \text{ dB}$, 设在该区间内的分布类型为反正弦分布, $k = \sqrt{2}$, 得到

$$u_4 = a_4 / k = 0.051 \text{ dB}$$

5) 衰减器输出端与功率传感器输入端间失配误差引入的标准不确定度 u_5

功率传感器输入端电压驻波比 ≤ 1.1

衰减器输出端电压驻波比 ≤ 1.2

失配误差极限用下式估计:

$$\Delta_{p2} = 4.34 \times 2 \times |\Gamma_{S2}| |\Gamma_{U2}|$$

式中, Δ_{p2} —失配误差极限值, dB;

Γ_{S2} —衰减器输出端反射系数, 无量纲;

Γ_{U2} —功率传感器输入端反射系数, 无量纲。

根据前面给出的技术指标得到:

$$|\Gamma_{S2}| = (1.2-1) / (1.2+1) = 0.091$$

$$|\Gamma_{U2}| = (1.1-1) / (1.1+1) = 0.048$$

$$\Delta_{p2} = 4.34 \times 2 \times |\Gamma_{S2}| |\Gamma_{U2}| = 0.038 \text{ dB}$$

所以 $a_5 = 0.038 \text{ dB}$, 设在该区间内的分布类型为反正弦分布, $k = \sqrt{2}$ 。

$$u_5 = a_5 / k = 0.027 \text{ dB}$$

6) 热效应引起的衰减器衰减变化引入的标准不确定度 u_6

经过实验, 热效应引起的大功率衰减器衰减值的变化为 0.060 dB , 假设为均匀分布, $k = \sqrt{3}$, 标准不确定度

$$u_6 = a_6 / k = 0.035 \text{ dB}$$

7) 衰减器衰减溯源引入的标准不确定度 u_7

根据衰减器的溯源证书, 其溯源的不确定度为 0.10 dB ($k=2$),

因此, $u_7 = 0.05 \text{ dB}$

8) 测量重复性引入的标准不确定度 u_8

被校无源互调测试仪输出频率为 935 MHz , 输出功率为 43 dBm , 进行 10 次重复性测量, 测量结果如下:

测量次数	测量值/ dBm
1	43.16
2	43.14
3	43.12

批注 [猫猫爱吃草1]: 1、0.06dB 影响小且无实验数据支撑, 建议规范里去掉该项

2、低无源互调电缆的技术指标、影响需要考虑, 每年需要校准其性能 (计量特性)

批注 [猫猫爱吃草2]: 指标要求

4	43.14
5	43.16
6	43.10
7	43.11
8	43.12
9	43.15
10	43.16

则单次测量结果的实验标准差

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0.022 \text{dB}$$

标准不确定度

$$u_8 = 0.022 \text{dB}$$

C.3.4 不确定度合成

1) 不确定度分量综合表

表 C.3 输出功率测量不确定度分量综合表

序号	不确定度分量					
	不确定度来源	类型	符号及数值/ dB	分布	包含 因子	标准不确定度符 号及数值/ dB
1	功率指示器参考功率最大允许误差	B	$a_1=0.043$	均匀	$\sqrt{3}$	$u_1=0.025$
2	功率传感器校准因子溯源	B	$a_2=0.086$	正态	2	$u_2=0.043$
3	功率传感器线性	B	$a_3=0.128$	均匀	$\sqrt{3}$	$u_3=0.074$
4	无源互调测试仪输出端与衰减器输入端间失配	B	$a_4=0.072$	反正弦	$\sqrt{2}$	$u_4=0.051$
5	衰减器输出端与功率传感器输入端间失配	B	$a_5=0.038$	反正弦	$\sqrt{2}$	$u_5=0.027$
6	热效应引起的衰减器衰减改变	B	$a_6=0.060$	均匀	$\sqrt{3}$	$u_6=0.035$
7	衰减器衰减溯源	B	$a_7=0.010$	正态	2	$u_7=0.005$
8	测量重复性	A	/	/	/	$u_8=0.022$

2) 合成标准不确定度

以上各分量独立

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^8 u_i^2} = 0.114 \text{dB}$$

C.3.5 扩展不确定度

包含因子取 $k=2$

$$U=k \times u_c=2 \times 0.114\text{dB}=0.228\text{dB} \approx 0.23\text{dB}$$

C.4 无源互调测量测量不确定度

根据规范 7.4 中提出的校准方法，所用的标准器为测量接收机。

C.4.1 不确定度来源

- 1) 衰减器输出端功率校准时测量接收机最大允许误差引入的标准不确定度 u_1
- 2) 功率校准时衰减器输出端与测量接收机功率传感器间失配引入的标准不确定度 u_2
- 3) 衰减器输出端与被校无源互调测试仪端口间失配引入的标准不确定度 u_3
- 4) 测量重复性引入的标准不确定度 u_4

C.4.2 不确定度分析

- 1) 衰减器输出端功率校准时测量接收机最大允许误差引入的标准不确定度 u_1

根据所用测量接收机的技术指标，在频率范围为 4.2 GHz 至 8 GHz，电平范围为 -120 dBm 至 +26 dBm 时，绝对功率测量的最大允许误差为： $\pm (0.099 \text{ dB} + 0.005 \text{ dB}/10 \text{ dB 步进} \times \text{读数})$ 。

在测量功率为 -70dBm 时，其最大允许误差为

$$a_{11}=\pm (0.099 \text{ dB}+0.005\text{dB} \times 7)=\pm 0.134\text{dB},$$

假设为均匀分布， $k=\sqrt{3}$ ，标准不确定度

$$u_{11}=a_{11}/k=0.077\text{dB}$$

在测量功率为 -120dBm 时，其最大允许误差为

$$a_{12}=\pm (0.099 \text{ dB}+0.005\text{dB} \times 12)=\pm 0.159\text{dB},$$

假设为均匀分布， $k=\sqrt{3}$ ，标准不确定度

$$u_{12}=a_{12}/k=0.092\text{dB}$$

- 2) 信号发生器输出功率校准时衰减器输出端与测量接收机功率传感器间失配引入的标准不确定度 u_2

衰减器输出端口驻波系数为 1.2，测量接收机功率传感器驻波系数为 1.2，

失配误差极限用下式估计：

$$\Delta_{p3}=4.34 \times 2 \times |\Gamma_{S3}| |\Gamma_{U3}|$$

式中， Δ_{p3} —失配误差极限值，dB；

Γ_{S3} —信号发生器输出端口反射系数，无量纲；

Γ_{U3} —衰减器输入端反射系数，无量纲。

$$|\Gamma_{S3}|=(1.2-1)/(1.2+1)=0.091$$

$$|\Gamma_{U3}|=(1.2-1)/(1.2+1)=0.091$$

$$\Delta_{p3}=4.34 \times 2 \times |\Gamma_{S3}| |\Gamma_{U3}|$$

所以 $a_2=0.072\text{dB}$ ，设测量值落在该区间内的概率分布为反正弦分布， $k=\sqrt{2}$ 。

$$u_2=a_2/k=0.051\text{dB}$$

- 3) 衰减器输出端与被校无源互调测试仪间失配引入的标准不确定度 u_{35}

30dB 衰减器输出端的驻波系数为 1.2，无源互调测试仪输入端的驻波系数为 1.2。

失配误差极限用下式估计：

$$\Delta_{p4}=4.34 \times 2 \times |\Gamma_{S4}| |\Gamma_{U4}|$$

式中， Δ_{p4} —失配误差极限值，dB；

Γ_{S4} —信号发生器输出端口反射系数，无量纲

Γ_{U4} —衰减器输入端反射系数，无量纲。

$$|\Gamma_{S4}| = (1.2-1) / (1.2+1) = 0.091$$

$$|\Gamma_{U4}| = (1.2-1) / (1.2+1) = 0.091$$

$$\Delta_{p4} = 4.34 \times 2 \times |\Gamma_{S4}| |\Gamma_{U4}|$$

所以 $a_3 = 0.072\text{dB}$ ，设测量值落在该区间内的概率分布为反正弦分布， $k = \sqrt{2}$ 。

$$u_3 = a_3 / k = 0.051\text{dB}$$

4) 校准过程的连接及读数重复性引入的标准不确定度 u_4

设置信号发生器的输出频率为 910MHz，调整信号发生器输出，使得测量接收机测量信号发生器外接衰减器后的输出功率为 -70.00dBm，将此信号输入至无源互调测试仪的反向端，重复测量 10 次，测量结果如下：

测量次数	无源互调测试仪指示值/ dBm
1	-70.1
2	-70.2
3	-70.2
4	-70.1
5	-70.2
6	-70.1
7	-70.1
8	-70.2
9	-70.2
10	-70.2

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0.05\text{dB}$$

即 $u_{41} = 0.05\text{dB}$

设置信号发生器的输出频率为 910MHz，调整信号发生器输出，使得测量接收机测量信号发生器外接衰减器后的输出功率为 -120.00dBm，将此信号输入至无源互调测试仪的反向端，重复测量 10 次，测量结果如下：

测量次数	无源互调测试仪指示值/ dBm
1	-120.0
2	-120.3
3	-120.0
4	-120.2
5	-120.0
6	-120.2
7	-120.0
8	-120.3
9	-120.2

10	-120.1
----	--------

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} = 0.13dB$$

即 $u_{42}=0.13dB$

C.4.3 不确定度合成

1) 不确定度分量综合表

表 C.4 不确定度分量综合表

序号	不确定度分量					标准不确定度 符号及数值/ dB
	不确定度来源	类型	符号及数值/ dB	分布	包含因子	
1	衰减器输出端功率校准时测量接收机最大允许误差 (-70dBm)	B	$a_{11}=0.134$	均匀	$\sqrt{3}$	$u_{11}=0.077$
	衰减器输出端功率校准时测量接收机最大允许误差 (-120dBm)	B	$a_{12}=0.159$	均匀	$\sqrt{3}$	$u_{12}=0.092$
2	功率校准时衰减器输出端与测量接收机功率传感器间失配	B	$a_2=0.072$	反正弦	$\sqrt{2}$	$u_2=0.051$
3	衰减器输出端与被校无源互调测试仪间失配	B	$a_3=0.072$	反正弦	$\sqrt{2}$	$u_3=0.051$
4	-70dBm 校准过程的连接及读数重复性	A	/	/	/	$u_{41}=0.05$
	-120dBm 校准过程的连接及读数重复性	A	/	/	/	$u_{42}=0.13$

2) 不确定度合成

各分量独立不相关

对于-70dBm 的电平，标准不确定度

$$u_c = \sqrt{u_{11}^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_{41}^2} = 0.12dB$$

对于-120dBm 的电平，标准不确定度为

$$u_3 = \sqrt{u_{12}^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_{42}^2} = 0.18dB$$

C.4.4 扩展不确定度

1) 包含因子取 $k=2$ ，对于-70dBm 的电平，扩展不确定度

$U=0.24dB$ ，取整 $U=0.3dB$ 。

2) 包含因子取 $k=2$ ，对于-120dBm 的电平，扩展不确定度

$U=0.36\text{dB}$ ，取整 $U=0.4\text{dB}$ 。
