

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 1887—2020

射频与微波功率传感器校准规范

Calibration Specification for RF & Microwave Power Sensors

2020-11-26 发布

2021-05-26 实施

国家市场监督管理总局 发布

射频与微波功率传感
器校准规范

Calibration Specification for RF &
Microwave Power Sensors

JJF 1887—2020

归口单位：全国无线电计量技术委员会

主要起草单位：中国计量科学研究院

参加起草单位：上海市计量测试技术研究院

中国电子科技集团公司第四十一研究所

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：

李 勇（中国计量科学研究院）

崔孝海（中国计量科学研究院）

赵 巍（中国计量科学研究院）

参加起草人：

沈菊霞（上海市计量测试技术研究院）

郟泽奇（中国电子科技集团公司第四十一研究所）

市场监管总局

目 录

引言	(II)
1 范围	(1)
2 概述	(1)
3 计量特性	(1)
3.1 频率范围	(1)
3.2 电平范围	(1)
3.3 校准因子	(1)
3.4 电压驻波比	(1)
4 校准条件	(1)
4.1 环境条件	(1)
4.2 校准用设备	(1)
5 校准项目和校准方法	(2)
5.1 校准项目	(2)
5.2 外观及工作正常性检查	(3)
5.3 校准因子	(3)
5.4 反射系数	(5)
6 校准结果表达	(6)
7 复校时间间隔	(6)
附录 A 原始记录格式	(7)
附录 B 校准证书内页格式	(10)
附录 C 主要项目校准不确定度评定示例	(11)
附录 D 源反射系数	(18)
附录 E 校准因子的校准原理	(21)

引 言

本规范依据 JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》编制。测量不确定度评定依据 JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》和 JJF 1059.2—2012《用蒙特卡洛法评定测量不确定度》。

本规范为首次发布。

市场监管总局

射频与微波功率传感器校准规范

1 范围

本规范适用于频率范围为 9 kHz~75 GHz、电平范围包含 0 dBm~10 dBm 的射频与微波功率传感器的校准。工作电平小于 0 dBm 的功率传感器可参考本规范进行校准。

2 概述

射频和微波功率传感器（以下简称功率传感器）配接功率指示器组成的功率计是通信、广播、电视、雷达、宇航、国防军工等技术领域不可缺少的功率测量仪器。功率传感器由接头、功率敏感部件、直流或低频电路等部分组成。功率传感器有多种类型，按工作原理可以分为热敏电阻功率传感器、热偶功率传感器和二极管功率传感器等；按接头型式可以分为同轴和波导型功率传感器。

3 计量特性

3.1 频率范围：9 kHz~75 GHz。

3.2 电平范围：0 dBm~10 dBm。

3.3 校准因子：大于 30%，校准因子相对不确定度为 0.7%~10%，（ $k=2$ ）。

3.4 电压驻波比：

<1.3（频率范围：9 kHz~18 GHz）；

<1.4（频率范围：18 GHz~26.5 GHz）；

<1.6（频率范围：26.5 GHz~40 GHz）；

<1.8（频率范围：40 GHz~50 GHz）；

<1.9（频率范围：50 GHz~75 GHz）。

注：以上技术指标不作合格性判别，仅提供参考。

4 校准条件

4.1 环境条件

环境温度：（23±5）℃，校准过程中温度波动不超过 1℃；

相对湿度：20%~80%；

电源电压及频率：（220±11）V，（50±1）Hz；

其他：周围无影响校准系统正常工作的机械振动和电磁场干扰。

4.2 校准用设备

4.2.1 标准功率计（2台）

频率范围：9 kHz~75 GHz；

功率测量范围：-20 dBm~+10 dBm；

校准因子相对不确定度：0.5%~4.0%（ $k=2$ ）。

4.2.2 功率指示器

频率范围：9 kHz~75 GHz；

功率测量范围：-20 dBm~+10 dBm；

不确定度：0.5% ($k=2$)。

4.2.3 信号源

频率范围：9 kHz~75 GHz，最大允许误差： $\pm 1 \times 10^{-5}$ ；

输出电平范围：0 dBm ~10 dBm，幅度稳定度：优于 0.02 dB/10 min；

谐波抑制： < -25 dBc。

4.2.4 功率传递标准

频率范围：9 kHz~75 GHz；

功率测量范围：0.5 mW~10 mW；

校准因子 K_{cs} 不确定度：0.5%~4.0% ($k=2$)；

输出端口等效源电压驻波比： < 1.65 。

4.2.5 两电阻功分器

频率范围：10 MHz~75 GHz；

端口对称性： < 0.4 dB。

4.2.6 定向耦合器

频率范围：10 MHz~75 GHz；

方向性： > 20 dB；

输出端电压驻波比： < 1.65 。

4.2.7 矢量网络分析仪

频率范围：9 kHz~75 GHz；

反射系数模值测量不确定度：0.005~0.02 ($k=2$)；

反射系数相位测量不确定度： $0.5^\circ + 2\arcsin(u_{rel})$ ($k=2$)。

式中 u_{rel} 为反射系数线性模值的相对标准不确定度。

4.2.8 10 dB 固定衰减器

频率范围：10 MHz ~75 GHz；

端口驻波比： < 1.65 。

5 校准项目和校准方法

5.1 校准项目

校准项目见表 1。

表 1 校准项目列表

序号	校准项目	类型	条款
1	外观及工作正常性检查	功能检查	5.2
2	校准因子	量值校准	5.3
3	反射系数	量值校准	5.4

5.2 外观及工作正常性检查

a) 被校功率传感器应外观完好，端口无明显松动，内外表面均应清洁无污物、无明显损伤。

b) 被校功率传感器和与之配合使用的指示器（或安装有相应软件的计算机）连接后，应能正常工作。

c) 校准所用标准器和被校功率传感器应按照技术说明书要求完成预热并运行自校准和清零等操作。

d) 将检查结果记录于附录 A 表 A.1 中。

5.3 校准因子

5.3.1 交替比较法

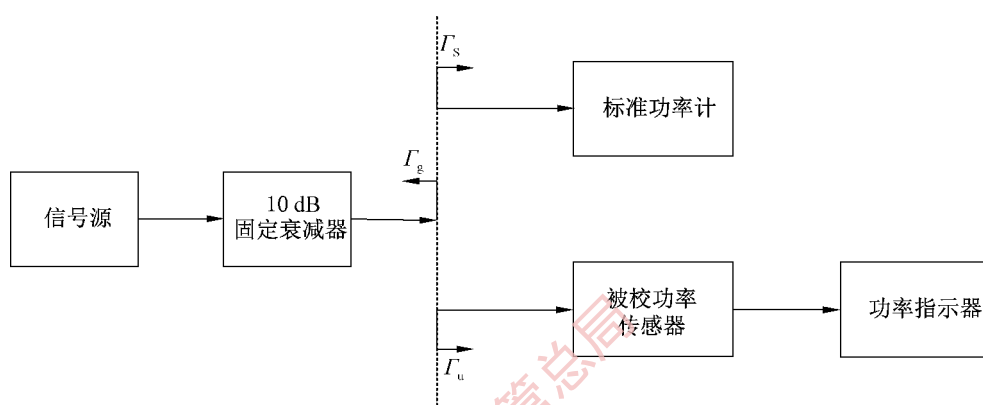


图 1 交替比较法校准框图

Γ_s —标准功率计反射系数； Γ_g —信号源反射系数； Γ_u —被测功率传感器反射系数

a) 按图 1 连接仪器，根据所需校准频率范围下限设置信号源频率；

b) 将标准功率计连接到测试端面，开启信号源输出，调节输出电平使得标准功率计读数接近所需要的校准功率值，通常为 1 mW；

c) 等待标准功率计读数稳定后，记录其指示值 P_{bs} 于附录 A 表 A.2 中相应位置；

d) 连接被校功率传感器至测试端面，等待功率指示器读数稳定后，记录其指示值 P_{bu} 于附录 A 表 A.2 中相应位置，关闭信号源输出；

e) 根据被校功率传感器的工作频率范围、实际需要和标准功率计具有校准因子的频点选择新的校准频率，重复步骤 b) ~ d)，直至完成全部所需频率的校准，然后根据附录 A 表 A.2 按照式 (1) 计算被校功率传感器的校准因子。

$$K_u = K_s \frac{P_{bu}}{P_{bs}} M \quad (1)$$

式中：

K_u ——被校功率传感器的校准因子；

K_s ——标准功率计的校准因子；

P_{bu} ——功率指示器示值，mW；

P_{bs} ——标准功率计示值，mW；

M ——失配因子。

注：

1 如果标准功率计处于频率修正模式，式（1）中 K_s 取值为 1，否则取其实际值代入计算。

2 采用交替比较法无法准确获得 M ，用式（1）计算校准因子时可令 $M=1$ ，由此引入的误差将在不确定度评定时予以考虑。

5.3.2 传递标准法

a) 按图 2 连接仪器，根据被校功率传感器频率范围下限设置信号源频率，开启其输出；

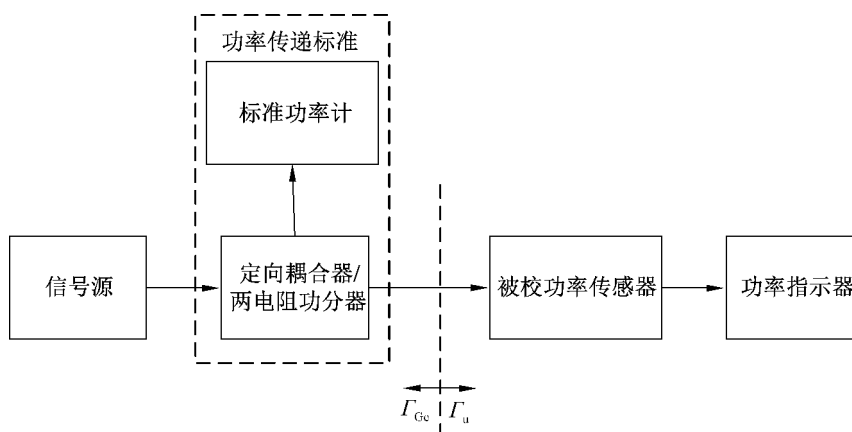


图 2 传递标准法校准框图

b) 调节输出电平使得功率指示器读数接近所需要的校准功率值，通常为 1 mW；

c) 等待标准功率计和功率指示器读数稳定后，记录标准功率计示值 P_{cs} 和功率指示器示值 P_{bu} 于附录 A 表 A.3 中相应位置；

d) 根据被校功率传感器的工作频率范围、实际需要和传递标准具有校准因子的频点选择新的校准频率，重复步骤 b) ~ c)，直至完成全部所需频率的校准，关闭信号源输出，然后根据附录 A 表 A.3 按照式（2）计算被校功率传感器的校准因子。

$$K_u = K_c \frac{P_{bu}}{P_{cs}} M_u \quad (2)$$

式中：

K_u ——被校功率传感器的校准因子；

K_c ——传递标准的校准因子；

P_{bu} ——功率指示器示值，mW；

P_{cs} ——标准功率计示值，mW；

M_u ——失配因子。

注：采用传递标准法无法准确获得 M_u ，用式（2）计算校准因子时可令 $M_u=1$ ，由此引入的误差将在不确定度评定时予以考虑。

5.3.3 直接比较法

a) 按图 3 连接仪器，根据被校功率传感器工作频率范围下限设置信号源频率；

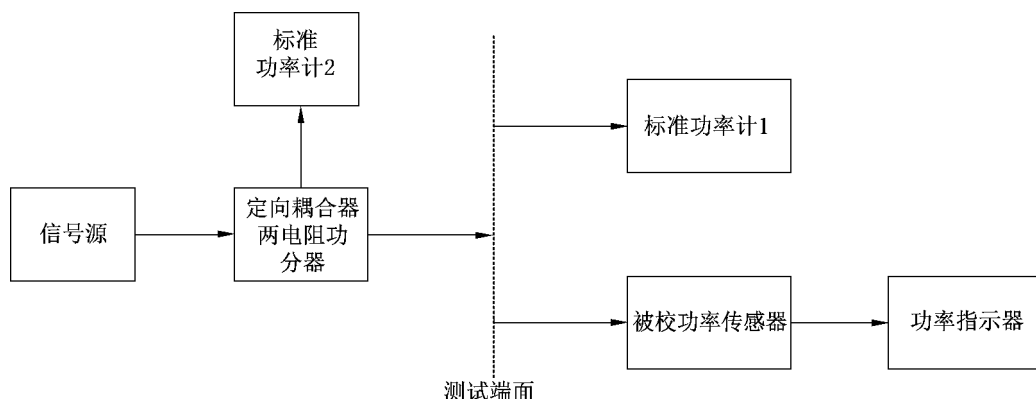


图3 直接比较法校准框图

b) 将标准功率计1连接到测试端面，开启信号源输出，调节输出电平使得标准功率计1读数接近所需的校准功率值，通常为1 mW；

c) 等待标准功率计1及标准功率计2读数稳定后，记录其指示值 P_{bs} 、 P_{cs} 于附录A表A.4中相应位置；

d) 连接被校功率传感器至测试端面，等待功率指示器及标准功率计2读数稳定后，记录其指示值 P_{bu} 、 P_{cu} 于附录A表A.5中相应位置；

e) 根据被校功率传感器的工作频率范围、实际需要和标准功率计1具有校准因子的频点选择新的校准频率，重复步骤b)~d)，直至完成全部所需频率的校准，关闭信号源输出，然后根据附录A表A.4、A.5按照式(3)计算被校功率传感器的校准因子。

$$K_u = K_s \frac{P_{cs}}{P_{cu}} \frac{P_{bu}}{P_{bs}} M \quad (3)$$

式中：

K_u ——被校功率传感器校准因子；

K_s ——标准功率计1的校准因子；

P_{cs} ——连接标准功率计1时标准功率计2的示值，mW；

P_{bs} ——标准功率计1示值，mW；

P_{cu} ——连接被校功率传感器时标准功率计2的示值，mW；

P_{bu} ——功率指示器示值，mW；

M ——失配因子， $M = \frac{|1 - \Gamma_{Ge} \Gamma_u|^2}{|1 - \Gamma_{Ge} \Gamma_s|^2}$ ，其中：

Γ_{Ge} ——插入的三端口器件等效源反射系数；

Γ_u ——被校功率传感器反射系数；

Γ_s ——标准功率计1的反射系数。

5.4 反射系数

a) 按说明书要求对矢量网络分析仪进行通电预热；

b) 设置矢量网络分析仪测量参数为 S_{11} ，对矢量网络分析仪进行单端口校准；

c) 设置矢量网络分析仪的中频带宽为适当值（通常为100 Hz），在被校功率传感

器的工作频率范围内选择矢量网络分析仪的测试频率和测量点数；所选校准频点应与被校功率传感器校准因子的校准频点相同；

d) 按图 4 所示连接被校功率传感器于测试端口，设置数据格式为反射系数模值加相角，读取反射系数的数据，将所得结果记录在附录 A 表 A.6 中的相应位置。

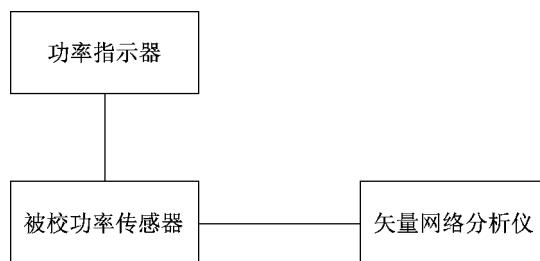


图 4 反射系数的校准框图

注：校准热敏电阻型功率传感器的反射系数时，必须将其与配接的功率指示器连接并处于正常工作状态，其他功率传感器一般无需连接功率指示器。

6 校准结果表达

功率传感器校准后，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。

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

原始记录格式

表 A.1 外观及工作正常性检查

检查项目	检查结果
外观检查	
工作正常性检查	

表 A.2 校准因子校准记录表（交替比较法）

频率 MHz	K_s	P_{bs} : 标准功率 计示值/mW	P_{bu} : 功率指示 器示值/mW	K_u	k_{95}	$U(K_u)$

失配严重时，表 A.2 中 k_{95} 使用蒙特卡洛方法（MCM）计算获得；如果失配引入的标准不确定度分量与其他不确定度分量量值接近，可以认为扩展不确定度接近正态分布，直接取包含因子为 2，下同。

表 A.3 校准因子校准记录表（传递标准法）

频率 MHz	K_c	P_{cs} : 标准功率 计示值/mW	P_{bu} : 功率指示 器示值/mW	K_u	k_{95}	$U(K_u)$

表 A.4 校准因子校准记录表 (直接比较法—连接标准功率传感器)

频率/MHz	P_{bs} : 标准功率计 1 示值/mW	P_{cs} : 标准功率计 2 示值/mW

表 A.5 校准因子校准记录表 (直接比较法—连接被校功率传感器)

频率 MHz	K_s	P_{bu} : 功率指示器示值 mW	P_{cu} : 标准功率计 2 示值 mW	K_u	$U(K_u)$

按式 (3) 计算 K_u 时, 式中 M 取自表 A.6, 计算扩展不确定度时取包含因子 $k=2$ 。

表 A.6 反射系数校准记录表

频率 MHz	Γ_{Ge}		Γ_s		Γ_u		M 失配因子	$u(M)$ M 的标准不确定度
	模值	相角	模值	相角	模值	相角		

表 A.6 (续)

频率 MHz	Γ_{Ge}		Γ_s		Γ_u		M 失配因子	$u(M)$ M 的标准不确定度
	模值	相角	模值	相角	模值	相角		

表 A.6 中, Γ_{Ge} 、 Γ_s 、 Γ_u 分别为源、标准功率计及被校功率传感器的反射系数, 失配因子 M 及其标准不确定度 $u(M)$ 使用 MCM 计算获得。

市场监管总局

附录 B

校准证书内页格式

表 B.1 校准因子

频率/MHz	校准因子标称值	校准因子测量值	相对扩展不确定度 $U(k=2)$

表 B.2 反射系数

频率/MHz	反射系数模值	
	测量值	不确定度 $U(k=2)$

附录 C

主要项目校准不确定度评定示例

校准因子是以数个因子乘积的形式给出的，在各因子的相对标准不确定度已知的情况下，校准因子相对标准不确定度计算公式的形式比较简单。设已知校准因子 K_u 的表达式为 $K_u = x_1 x_2 \cdots x_N$ ， x_i 的相对标准不确定度为 $u(x_i)$ ($i=1 \sim N$)， K_u 测量结果的标准差为 s ，合成后 K_u 的相对标准不确定度 $u_c(K_u)$ 由下式计算：

$$u_c(K_u) = \sqrt{s^2 + \sum_{i=1}^N u^2(x_i)}$$

本规范后面涉及校准因子不确定度计算时给出的计算结果均为相对不确定度。

C.1 对失配引入的不确定度的评定

失配误差是微波功率测量过程中特有的一个不确定度来源，下面分两种情况介绍其评定方法。

C.1.1 已知源反射系数的模值

多数情况下仅能获得源反射系数模值，无法计算失配因子，失配引入的不确定度按照最坏相位组合情况考虑，即取其极限误差值作为失配引入的扩展不确定度。

C.1.2 已知源反射系数的模值及相角

已知源反射系数的模值和相角就可以计算失配因子，失配因子的不确定度可以通过蒙特卡洛算法 (MCM) 进行评定。

C.2 交替比较法

C.2.1 测量模型

$$K_u = K_s \frac{P_{bu}}{P_{bs}} \frac{|1 - \Gamma_g \Gamma_u|^2}{|1 - \Gamma_g \Gamma_s|^2} = K_s \frac{P_{bu}}{P_{bs}} \frac{M_u}{M_s}$$

式中：

M_s ——标准功率计失配因子。

C.2.2 测量不确定度传播公式

$$u^2(K_u) = u^2(K_s) + u^2(P_{bs}) + u^2(P_{bu}) + u^2(M_s) + u^2(M_u)$$

C.2.3 不确定度来源

- 标准功率计校准因子 K_s 引入的相对标准测量不确定度 $u(K_s)$ ；
- 标准功率计示值功率 P_{bs} 引入的相对标准测量不确定度 $u(P_{bs})$ ；
- 功率指示器示值功率 P_{bu} 引入的相对标准测量不确定度 $u(P_{bu})$ ；
- 标准功率计失配引入的相对标准测量不确定度 $u(M_s)$ ；
- 被校功率传感器失配引入的相对标准测量不确定度 $u(M_u)$ ；
- 接头连接等重复性引入的相对标准测量不确定度 s 。

C.2.4 不确定度评定

1) 失配引入的不确定度计算

取衰减器输出端口反射系数的模值作为 Γ_g 的模值，

$$M_u = |1 - \Gamma_g \Gamma_u|^2 = 1 - 2|\Gamma_g||\Gamma_u|\cos(\theta_g + \theta_u) + |\Gamma_g|^2|\Gamma_u|^2$$

式中：

θ_g ——信号源反射系数相位；

θ_u ——被测功率传感器反射系数相位。

分析上式可知， M_u 分布在以 1 为中心、以 $1 \pm 2|\Gamma_g||\Gamma_u|$ 为边界的区间内，由于无法准确获得源反射系数的相角 θ_g ，只能将 M_u 取值为 1。已知 $|\Gamma_g|$ 、 $|\Gamma_u|$ 时，可以根据上式得到取 $M_u=1$ 所导致的 M_u 的偏差极限为 $\pm 2|\Gamma_g||\Gamma_u|$ ，即取了 θ_g 、 θ_u 最坏相位组合。于是可知 M_u 的扩展不确定度为 $2|\Gamma_g||\Gamma_u|$ （包含概率接近 100%），表示为

$$U(M_u) = 2|\Gamma_g||\Gamma_u|$$

注：通常 $2|\Gamma_g||\Gamma_u| \ll 1$ ，故可以近似地认为 $2|\Gamma_g||\Gamma_u|$ 也是 M_u 的相对扩展不确定度，下同。

同样地，因为

$$M_s = |1 - \Gamma_g \Gamma_s|^2 = 1 - 2|\Gamma_g||\Gamma_s|\cos(\theta_g + \theta_s) + |\Gamma_g|^2|\Gamma_s|^2$$

因而有

$$U(M_s) = 2|\Gamma_g||\Gamma_s|$$

M_s 和 M_u 服从 U 型分布，计算标准不确定度时将 $U(M_s)$ 除以因子 $\sqrt{2}$ 。如果在某一频点， $|\Gamma_g|=0.2$ ， $|\Gamma_s|=0.05$ ， $|\Gamma_u|=0.06$ ，则分别有

$$u(M_s) = \frac{1}{\sqrt{2}} \times 2 \times 0.2 \times 0.05 = 0.014, \quad u(M_u) = \frac{1}{\sqrt{2}} \times 2 \times 0.2 \times 0.06 = 0.017$$

2) 源自校准证书的各不确定度分量计算

根据上级计量部门出具的证书可以得到， $U(K_s) = 0.01 (k=2)$ ， $U(P_{bs}) = 0.002 (k=2)$ ， $U(P_{bu}) = 0.002 (k=2)$ ，则可以计算得到各分量的标准不确定度：

$$u(K_s) = U(K_s)/2 = 0.01/2 = 0.005$$

$$u(P_{bs}) = U(P_{bs})/2 = 0.002/2 = 0.001$$

$$u(P_{bu}) = U(P_{bu})/2 = 0.002/2 = 0.001$$

3) 实验标准差

计算得多次测量平均值的相对实验标准差 $s = 0.003$ 。

交替比较法不确定度分量汇总见表 C.1。

表 C.1 交替比较法不确定度分量一览表

不确定度来源	分布	评定方法	包含因子 (k)	u
K_s	正态	B类	2	0.005
P_{bs}	正态	B类	2	0.001
P_{bu}	正态	B类	2	0.001
M_s	U型	B类	$\sqrt{2}$	0.014
M_u	U型	B类	$\sqrt{2}$	0.017
测量结果平均值		A类		$s = 0.003$

4) 标准不确定度的合成

根据不确定度合成法则，校准因子 K_u 的合成标准不确定度为

$$\begin{aligned} u_c(K_u) &= \sqrt{u^2(K_s) + u^2(P_{bs}) + u^2(P_{bu}) + u^2(M_s) + u^2(M_u) + s^2} \\ &= \sqrt{0.005^2 + 0.001^2 + 0.001^2 + 0.014^2 + 0.017^2 + 0.003^2} = 0.022 \end{aligned}$$

5) 计算扩展不确定度

使用蒙特卡洛算法 (MCM) 确定包含因子，根据 $u_c(K_u)$ 的分布及包含因子 k_{95} ，用下式求得扩展不确定度：

$$U_{95}(K_u) = k_{95} \times u_c(K_u)$$

本例中，按 C.3.4 中注提供的算法可以算得 $P=4.2$ ，实际取 $P=5$ ，查 C.3.4 中注附表可得 k_{95} 为 1.54。则

$$U_{95}(K_u) = k_{95} \times u_c(K_u) = 1.54 \times 0.022 \approx 0.034$$

C.3 传递标准法

C.3.1 测量模型

$$K_u = K_c \frac{P_{bu}}{P_{cs}} |1 - \Gamma_g \Gamma_u|^2 = K_c \frac{P_{bu}}{P_{cs}} M_u$$

C.3.2 测量不确定度传播公式

$$u^2(K_u) = u^2(K_c) + u^2(P_{bu}) + u^2(M_u)$$

C.3.3 不确定度来源

- 传递标准校准因子 K_c 引入的相对标准测量不确定度 $u(K_c)$ ；
- 功率指示器示值功率 P_{bu} 引入的相对标准测量不确定度 $u(P_{bu})$ ；
- 失配引入的相对标准测量不确定度 $u(M_u)$ ；
- 接头连接重复性等引入的相对标准测量不确定度 s 。

C.3.4 不确定度评定

1) 失配引入的不确定度计算

$$M_u = |1 - \Gamma_g \Gamma_u|^2 = 1 - 2|\Gamma_g||\Gamma_u|\cos(\theta_g + \theta_u) + |\Gamma_g|^2|\Gamma_u|^2$$

参考 C.2.4 可得：

$$U(M_u) = 2|\Gamma_g||\Gamma_u|$$

M_u 服从反正弦分布，计算标准不确定度时将 $U(M_u)$ 除以因子 $\sqrt{2}$ 。如果在某一频点， $|\Gamma_g|=0.2$ ， $|\Gamma_u|=0.06$ ，可以算得

$$u(M_u) = \frac{1}{\sqrt{2}} \times 2 \times 0.2 \times 0.06 \approx 0.017$$

2) 源自校准证书的各不确定度分量计算

根据上级计量部门出具的证书可以得到 $U(K_c) = 0.01$ ($k=2$)， $U(P_{bu}) = 0.002$ ($k=2$)，则可以计算得到各标准不确定度分量：

$$u(K_c) = U(K_c)/2 = 0.01/2 = 0.005$$

$$u(P_{bu}) = U(P_{bu})/2 = 0.002/2 = 0.001$$

3) 实验标准差

计算得多次测量平均值的相对实验标准差 $s=0.003$ 。

传递标准法不确定度分量汇总见表 C.2。

表 C.2 传递标准法不确定度分量一览表

不确定度来源	分布	评定方法	包含因子 (k)	u
K_c	正态	B类	2	0.005
P_{bu}	正态	B类	2	0.001
M_u	U型	B类	$\sqrt{2}$	0.017
s		A类		0.003

4) 标准不确定度的合成

根据不确定度合成法则可计算得到合成标准不确定度：

$$\begin{aligned} u_c(K_u) &= \sqrt{u^2(K_c) + u^2(P_{bu}) + u^2(M_u) + s^2} \\ &= \sqrt{0.005^2 + 0.001^2 + 0.017^2 + 0.003^2} = 0.018 \end{aligned}$$

5) 计算扩展不确定度

按照蒙特卡洛算法(MCM)获得 $u_c(K_u)$ 的分布及包含因子 k_{95} ，结合本例可以算得 $k_{95}=1.7$ ，这样就可以根据下式求得扩展不确定度（见注）：

$$U_{95}(K_u) = k_{95} \times u_c(K_u) = 1.7 \times 0.018 \approx 0.031$$

注：采用交替比较法和传递标准法校准时，可能无法获得源反射系数的相位，也就不能计算得到失配因子 M ，只能认为 $M=1$ ，并且取了最坏相位组合情况下 M 误差的极限值作为其扩展不确定度。计算 K_u 的扩展不确定度时应当根据其实际分布确定包含因子，传统方法多是简单地按照正态分布取 k_{95} 为 2，但由于 M 服从反正弦分布，当 $u(M)$ 是主导不确定度分量时， K_u 也应当更接近于反正弦分布，建议使用蒙特卡洛方法计算包含因子 k_{95} 。设 P 为 $u(M)$ 与其他不确定度分量的合成值（方和根值）之比，计算得到的 P 与 k_{95} 的对应关系如表 C.3 所示，供参考。

表 C.3 P 与 k_{95} 的对应关系

P	k_{95}	P	k_{95}
1	1.90	6	1.52
2	1.75	7	1.50
3	1.64	8	1.48
4	1.58	9	1.47
5	1.54	10	1.46

C.4 直接比较法

C.4.1 测量模型

$$K_u = K_s \frac{P_{cs} P_{bu} |1 - \Gamma_{Ge} \Gamma_u|^2}{P_{cu} P_{bs} |1 - \Gamma_{Ge} \Gamma_s|^2} = K_s \frac{P_{cs} P_{bu}}{P_{cu} P_{bs}} M$$

C.4.2 测量不确定度传播公式

由于连接标准功率计 1 和连接被校功率传感器时标准功率计 2 的测量电平相近，功率比值 P_{cs}/P_{cu} 与标准功率计 2 的准确度、线性度几乎无关，其稳定性影响将在 s 中予以体现。与其他不确定度分量相比， $u(P_{cs}/P_{cu})$ 要小很多，所以在评定不确定度时认为其可忽略。故

$$u^2(K_u) = u^2(K_s) + u^2(P_{bs}) + u^2(P_{bu}) + u^2(M)$$

C.4.3 不确定度来源

- 标准功率计 1 校准因子 K_s 引入的相对标准测量不确定度 $u(K_s)$ ；
- 标准功率计 1 示值功率 P_{bs} 引入的测量相对标准不确定 $u(P_{bs})$ ；
- 功率指示器示值功率 P_{bu} 引入的相对标准测量不确定度 $u(P_{bu})$ ；
- 失配引入的相对标准测量不确定度 $u(M)$ ；
- 接头连接等重复性引入的相对标准测量不确定度 s 。

C.4.4 不确定度评定

直接比较法通过在信号源与测试端面之间插入已知等效源反射系数的三端口器件获得失配因子，减小了失配对测量不确定度的影响，大失配时的测量不确定度得到明显降低。当采用蒙特卡洛算法（MCM）计算失配因子 M 的不确定度时，由于各输入量均被认为服从正态分布， M 的不确定度接近服从正态分布，包含因子约等于 2。

C.4.4.1 失配引入的不确定度计算

已知某一频率时，源、标准功率传感器、被校功率传感器反射系数及各自的标准不确定度分别如表 C.4、表 C.5、表 C.6。

表 C.4 等效源反射系数 Γ_{Ge}

模值		相角 θ_{Ge} ($^{\circ}$)	
测量结果	标准不确定度	测量结果	标准不确定度
0.18	0.002 6	93.0	1.0

表 C.5 标准功率传感器反射系数 Γ_s

模值		相角 θ_s ($^{\circ}$)	
测量结果	标准不确定度	测量结果	标准不确定度
0.1	0.002 5	128.3	1.4

表 C.6 被校功率传感器反射系数 Γ_u

模值		相角 θ_u ($^{\circ}$)	
测量结果	标准不确定度	测量结果	标准不确定度
0.2	0.002 5	32.7	0.7

采用蒙特卡洛算法（MCM）评定 $u(M)$ 。MCM 法是一种以概率统计理论为指导的、使用大量伪随机数进行数值计算的方法。具体地说，如果已知函数 $y =$

$f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 及 $u(x_i)$, MCM 法会按照 x_i 的概率密度函数进行离散采样, 计算得到 y 的离散值并根据这种离散分布给出 y 的最佳估计值、标准不确定度和包含区间。

下面结合本例, 介绍 MCM 法实施步骤。

a) 数学模型

$$M = \frac{1 - 2|\Gamma_{Ge}| |\Gamma_u| \cos(\theta_{Ge} + \theta_u) + |\Gamma_{Ge}|^2 |\Gamma_u|^2}{1 - 2|\Gamma_{Ge}| |\Gamma_s| \cos(\theta_{Ge} + \theta_s) + |\Gamma_{Ge}|^2 |\Gamma_s|^2};$$

式中:

θ_{Ge} —— 等效信号源反射系数相位;

θ_s —— 标准功率传感器反射系数相位。

b) 设反射系数的模值和相角均服从正态分布;

c) 根据表 C.4、C.5、C.6, 并将各测量值的不确定度均视为服从正态分布, 通过数值方法产生每个量的随机样本 (通常 10^6 以上的样本量可以保证最终统计结果的稳定);

d) 将每个量的随机样本作为输入量代入测量方程中计算最终测量结果的随机样本, 对测量结果的随机样本进行统计分析, 最终得到测量结果的均值、标准不确定度、 k_{95} 等信息;

e) 本例的计算结果为:

$$\bar{M} = 1.016; u(M) = 0.0019; U(M) = 0.004 (k_{95} = 1.97)。$$

C.4.4.2 源自校准证书的各不确定度分量计算

根据上级计量部门出具的证书可以得到, $U(K_s) = 0.01 (k=2)$, $U(P_{bs}) = 0.002 (k=2)$, $U(P_{bu}) = 0.002 (k=2)$, 则计算得到各标准不确定度分量:

$$u(K_s) = U(K_s)/2 = 0.01/2 = 0.005$$

$$u(P_{bs}) = U(P_{bs})/2 = 0.002/2 = 0.001$$

$$u(P_{bu}) = U(P_{bu})/2 = 0.002/2 = 0.001$$

C.4.4.3 实验标准差

计算得多次测量平均值的相对实验标准差 $s = 0.003$ 。

直接比较法不确定度分量汇总表 C.7。

表 C.7 直接比较法不确定度分量一览表

不确定度来源	分布	评定方法	包含因子 (k)	u
K_s	正态	B类	2	0.005
P_{bs}	正态	B类	2	0.001
P_{bu}	正态	B类	2	0.001
M	正态	B类	2	0.0019
s		A类		0.003

根据不确定度合成法则, 计算合成标准不确定度:

$$u_c(K_u) = \sqrt{u^2(K_s) + u^2(P_{bs}) + u^2(P_{bu}) + u^2(M) + s^2}$$

$$=\sqrt{0.005^2+0.001^2+0.001^2+0.001^2+0.003^2}=0.0063$$

C.4.4.4 计算扩展不确定度

由于各不确定度分量均服从正态分布，取 k_{95} 为 2，得

$$U(K_u) = k_{95} \times u_c(K_u) = 2 \times 0.0063 \approx 0.013。$$

市场监管总局

附录 D

源反射系数

D.1 采用交替比较法校准时的源反射系数

采用交替比较法校准时，通常要在信号源与被校功率传感器之间插入一个衰减器、隔离器等二端口网络，以减少测量端面的源反射系数，下面结合图 D.1 给出插入衰减器后测量端面的源反射系数。

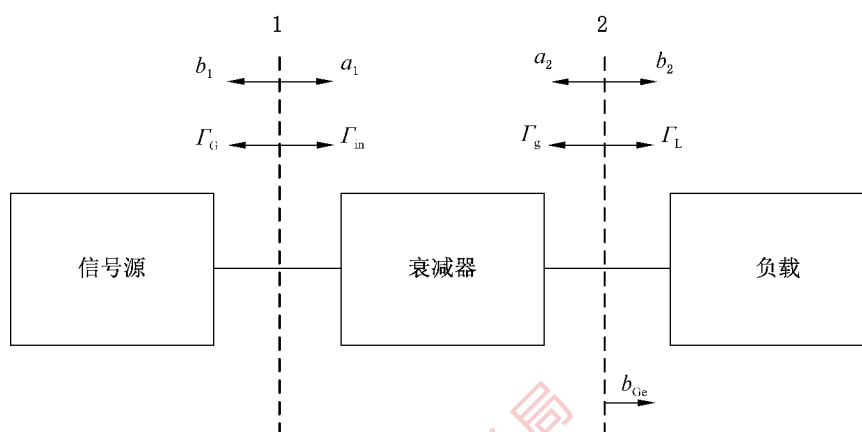


图 D.1 交替比较法示意图

根据图 D.1 所示的以衰减器作为插入元件的二端口网络的散射参数方程，可以计算得到以衰减器端口 2 为测量端面的源反射系数 Γ_g ：

$$\Gamma_g = s_{22} + \frac{s_{12}s_{21}\Gamma_G}{1 - s_{11}\Gamma_G} \quad (\text{D.1})$$

式中：

s_{12} 、 s_{21} ——衰减器的传输系数；

s_{11} 、 s_{22} ——衰减器的反射系数。

式中 Γ_G 为信号源的反射系数，在微波及更高频段，其模值通常较大。由式 (D.1) 可以看出，如果衰减器的 s_{12} 、 s_{21} 足够小， Γ_g 几乎与 Γ_G 无关，只要选用低反射系数 (s_{11} 、 s_{22}) 的衰减器就可以在测量端面获得低的源反射系数。当选用 10 dB 衰减器时，可以近似认为源反射系数为 s_{22} 。

D.2 采用传递标准法校准时的源反射系数

传递标准的源反射系数由生产厂家提供，一般只是给出其模值，有时也会以测试端口电压驻波比 (VSWR) 的形式给出，可用式 (D.2) 计算源反射系数模值：

$$|\Gamma_g| = \frac{\text{VSWR} - 1}{\text{VSWR} + 1} \quad (\text{D.2})$$

D.3 采用直接比较法时的源反射系数

直接比较法的校准过程分为两个步骤：

- 1) 用标准功率计确定传递标准的校准因子：

$$K_c = K_s \frac{P_{cs}}{P_{bs}} \frac{1}{|1 - \Gamma_{Ge} \Gamma_s|^2} \quad (D.3)$$

2) 用传递标准确定被校功率传感器的校准因子:

$$K_u = K_c \frac{P_{bu}}{P_{cu}} |1 - \Gamma_{Ge} \Gamma_u|^2 \quad (D.4)$$

将式 D.3 代入式 D.4 就可以得到直接比较法校准结果:

$$K_u = K_s \frac{P_{cs}}{P_{cu}} \frac{P_{bu}}{P_{bs}} \frac{|1 - \Gamma_{Ge} \Gamma_u|^2}{|1 - \Gamma_{Ge} \Gamma_s|^2} = K_s \frac{P_{cs}}{P_{cu}} \frac{P_{bu}}{P_{bs}} M \quad (D.5)$$

1)、2) 两个过程的测量结果均比例于三端口器件的 P_2/P_3 ，可以证明，在这种取功率比进行计算情况下，源反射系数 Γ_{Ge} 只由所使用的三端口器件的相关散射参数决定，与实际信号源反射系数无关，表示为

$$\Gamma_{Ge} = s_{22} - \frac{s_{21}s_{32}}{s_{31}} \quad (D.6)$$

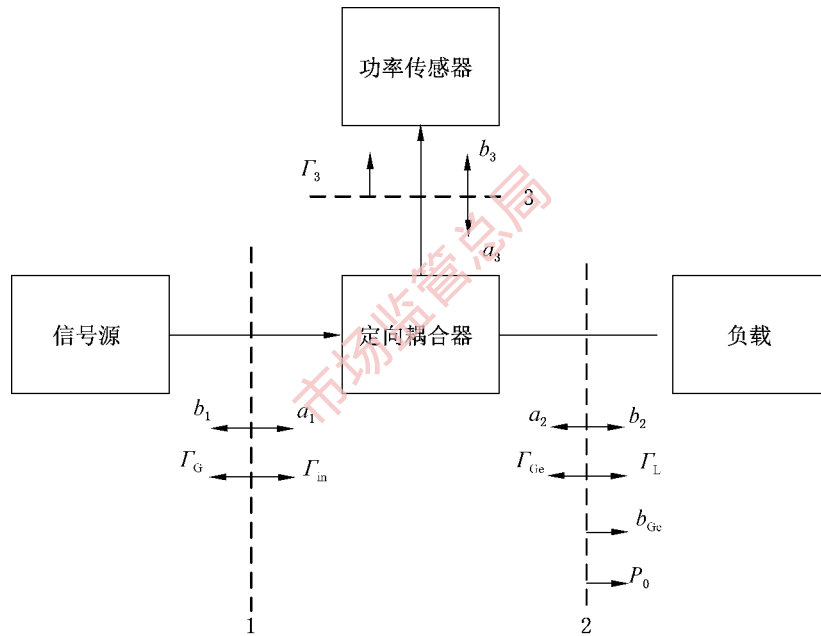


图 D.2 用三端口器件进行功率比值测量

由各端口散射参数方程可以得到:

$$\begin{aligned} b_2 &= b_3 \left[\frac{s_{21}}{s_{31}} + \left(s_{23} - \frac{s_{21}s_{33}}{s_{31}} \right) \Gamma_3 \right] + a_2 \left(s_{22} - \frac{s_{21}s_{32}}{s_{31}} \right) \\ &= b_3 \left[\frac{s_{21}}{s_{31}} + \left(s_{23} - \frac{s_{21}s_{33}}{s_{31}} \right) \Gamma_3 \right] + b_2 \Gamma_L \left(s_{22} - \frac{s_{21}s_{32}}{s_{31}} \right) \end{aligned} \quad (D.7)$$

于是可以得到 2、3 端口出射电压波幅之比:

$$\frac{b_2}{b_3} = \frac{\frac{s_{21}}{s_{31}} + \left(s_{23} - \frac{s_{21}s_{33}}{s_{31}} \right) \Gamma_3}{1 - \left(s_{22} - \frac{s_{21}s_{32}}{s_{31}} \right) \Gamma_L} \quad (D.8)$$

2、3 端口出射功率比值可以表示为:

$$\frac{P_2}{P_3} = \left| \frac{b_2}{b_3} \right|^2 = \frac{\left| \frac{s_{21}}{s_{31}} + \left(s_{23} - \frac{s_{21}s_{33}}{s_{31}} \right) \Gamma_3 \right|^2}{\left| 1 - \left(s_{22} - \frac{s_{21}s_{32}}{s_{31}} \right) \Gamma_L \right|^2} \quad (\text{D. 9})$$

式 (D. 9) 中, 分子为与负载反射无关的常数, 记作 K , 分母中因子 $\left(s_{22} - \frac{s_{21}s_{32}}{s_{31}} \right)$ 即为测试端面的源反射系数, 记作 Γ_{Ge} , 这样, 式 D. 9 就可以表示为

$$\frac{P_2}{P_3} = \frac{K}{|1 - \Gamma_{\text{Ge}}\Gamma_L|^2} \quad (\text{D. 10})$$

由式 (D. 6) 可以看出, Γ_{Ge} 与信号源反射系数无关, 它仅由三端口器件的相关散射参数决定, 而这些参数可以由矢量网络分析仪测得。由于可以准确得到失配因子的量值, 失配严重时校准因子的测量不确定度将得到极大的降低。

D. 4 等效源反射系数

将 P_3 送入稳幅器, 与设定值进行比较、放大后, 接入信号源的 AM 端口进行稳幅控制, 当环路增益足够高时, P_3 将始终保持与设定值相等, 于是式 (D. 10) 又可以表示为

$$P_2 = \frac{KP_3}{|1 - \Gamma_{\text{Ge}}\Gamma_L|^2} = \frac{K_1}{|1 - \Gamma_{\text{Ge}}\Gamma_L|^2} \quad (\text{D. 11})$$

式 (D. 11) 中, 由于 P_3 恒定, K_1 也是常数, 因此等效信号源的反射系数就是如式 (D. 6) 所表示的 Γ_{Ge} 。可以看出, 三端口器件为定向耦合器时, 只要其方向性 (s_{32}/s_{31}) 足够好, Γ_{Ge} 反射系数将接近 s_{22} ; 三端口器件为两电阻功分器时, 只要其端口对称性足够好 ($s_{21}=s_{31}$), Γ_{Ge} 将接近于 0。因此, 只要保证稳幅环路的增益足够高, 就可以在稳幅系统的控制下, 得到低的等效源反射系数。将标准功率座连接在等效信号源的测量端面可以对其输出功率定标, 给出的定标值表示测量端面连接无反射负载时的出射功率 P_0 。

附录 E

校准因子的校准原理

如果已知射频、微波功率测量系统的源反射系数 Γ_g ，并且知道该系统连接无反射负载时负载获得的功率 P_0 ，则当测试端面连接反射系数为 Γ_u 的功率传感器时，根据与之配接的功率指示器示值 P_{bu} 可以得到被校功率传感器的校准因子，即有

$$K_u = \frac{P_{bu}}{P_0} |1 - \Gamma_g \Gamma_u|^2 \quad (\text{E. 1})$$

校准功率传感器的校准因子时，必须首先获得 P_0 。

1) 交替比较法

交替比较法先用标准功率计定标测量系统当前设置条件下的 P_0 。工作频率及电平确定后，如果标准功率计的校准因子为 K_s ，功率示值为 P_{bs} ，反射系数为 Γ_s ，则该测试条件下测量系统的 P_0 可以通过下式得到

$$P_0 = \frac{P_{bs}}{K_s} |1 - \Gamma_g \Gamma_s|^2 \quad (\text{E. 2})$$

如果信号源足够稳定，则当测试端面连接反射系数为 Γ_u 的被校功率传感器且测得功率指示器示值为 P_{bu} 时，结合式 (E. 1)、式 (E. 2)，可以计算得到被校功率传感器的校准因子 K_u ，即有

$$K_u = K_s \frac{P_{bu}}{P_{bs}} \frac{|1 - \Gamma_g \Gamma_u|^2}{|1 - \Gamma_g \Gamma_s|^2} = K_s \frac{P_{bu}}{P_{bs}} M \quad (\text{E. 3})$$

无法准确获得源反系数相位时可将式 (E. 3) 中的 M 视为 1，由此引入的失配误差在不确定度评定时予以考虑。

2) 传递标准法

传递标准的校准因子 K_c 由上一级计量标准定标。校准时，根据标准功率计示值 P_{cs} 计算 P_0 ：

$$P_0 = \frac{P_{cs}}{K_c} \quad (\text{E. 4})$$

结合式 (E. 1)、式 (E. 4)，可以计算得到被校功率座的校准因子

$$K_u = K_c \frac{P_{bu}}{P_{cs}} |1 - \Gamma_g \Gamma_u|^2 = K_c \frac{P_{bu}}{P_{cs}} M_u \quad (\text{E. 5})$$

式中：

K_u ——被校功率传感器的校准因子；

K_c ——功率传递标准的校准因子；

P_{bu} ——功率指示器示值，mW；

P_{cs} ——标准功率计示值，mW；

Γ_g ——测试端口的源反射系数；

Γ_u ——被校功率传感器反射系数；

M_u ——失配因子。

无法准确获得源反射系数相位时可将式 (E.5) 中的 M_u 视为 1, 由此引入的失配误差在不确定度评定时予以考虑。

3) 直接比较法

三端口器件及标准功率计组成一套未定标的功率传递标准, 校准时, 在测量端面交替接入标准功率计与被校功率传感器, 而前者正是为了得到这一传递标准的校准因子 K_c :

$$K_c = K_s \frac{P_{cs}}{P_{bs}} \frac{1}{|1 - \Gamma_{Ge} \Gamma_s|^2} \quad (\text{E. 6})$$

式中:

K_s ——标准功率计 1 的校准因子;

P_{cs} ——连接标准功率计 1 时标准功率计 2 的功率示值, mW;

P_{bs} ——标准功率计 1 的功率示值, mW;

Γ_{Ge} ——等效源反射系数;

Γ_s ——标准功率计 1 的反射系数。

测试端面连接被校功率传感器时, 根据标准功率计示值 P_{cs} 可以得到 P_0 :

$$P_0 = \frac{P_{cs}}{K_c} \quad (\text{E. 7})$$

结合式 (E.1)、式 (E.7)、式 (E.6) 可得

$$K_u = K_s \frac{P_{cs}}{P_{cu}} \frac{P_{bu}}{P_{bs}} \frac{|1 - \Gamma_{Ge} \Gamma_u|^2}{|1 - \Gamma_{Ge} \Gamma_s|^2} = K_s \frac{P_{cs}}{P_{cu}} \frac{P_{bu}}{P_{bs}} M \quad (\text{E. 8})$$

式中:

P_{cu} ——连接被校功率传感器时标准功率计 2 的功率示值, mW;

P_{bu} ——功率指示器的功率示值, mW;

M ——失配因子。

$$M = \frac{|1 - \Gamma_{Ge} \Gamma_u|^2}{|1 - \Gamma_{Ge} \Gamma_s|^2}$$

M 的不确定度 $u(M)$ 采用 MCM 评定。