

中华人民共和国国家计量技术规范

JJF 1886—2020

电场探头校准规范

Calibration Specification for Electric Field Probes

2020-11-26 发布

2021-05-26 实施

国家市场监督管理总局 发布

电场探头校准规范

Calibration Specification for Electric
Field Probes

JJF 1886—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：江苏省计量科学研究院

福建省计量科学研究院

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：

李大博（中国计量科学研究院）

李 渤（中国计量科学研究院）

谢 鸣（中国计量科学研究院）

参加起草人：

赵品彰（江苏省计量科学研究院）

肖娜丽（福建省计量科学研究院）



目 录

引言	(II)
1 范围	(1)
2 引用文件	(1)
3 术语和定义	(1)
3.1 微横电磁波小室	(1)
3.2 吉赫兹横电磁波小室	(1)
3.3 场地电压驻波比	(1)
3.4 各向同性	(1)
4 概述	(1)
5 计量特性	(2)
5.1 电场强度	(2)
5.2 各向同性	(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 校准项目	(3)
7.2 校准方法	(4)
8 校准结果表达	(6)
9 复校时间间隔	(7)
附录 A 原始记录格式	(8)
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)

引 言

本规范依据 JJF 1071—2010《国家计量校准规范编写规则》和 JJF 1059.1—2012《测量不确定度评定与表示》编写。

本规范参照 IEEE Std 1309—2013 9 kHz~40 GHz 电磁场探头和传感器（天线除外）校准 [Calibration of Electromagnetic Field Sensors and Probes (Excluding Antennas) from 9 kHz to 40 GHz] 中的技术方法进行编写。

本规范为首次发布。



电场探头校准规范

1 范围

本规范适用于频率范围 10 MHz~18 GHz 电场探头的校准。

2 引用文件

IEEE Std 1309—2013 9 kHz~40 GHz 电磁场探头和传感器（天线除外）校准 [Calibration of Electromagnetic Field Sensors and Probes (Excluding Antennas) from 9 kHz to 40 GHz]。

凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本规范；凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本规范。

3 术语和定义

3.1 微横电磁波小室 μ transverse electromagnetic mode cell

微横电磁波小室 (μ transverse electromagnetic mode cell, 以下简称 μ TEM Cell) 是经过特殊设计的微小的横电磁波小室，其结构对称，外壳是用螺钉拧紧的两个铝壳，内部平板采用黄铜板。 μ TEM Cell 在频率高达 1 GHz 时仍可产生可计算的标准场强，用于校准不超出其均匀区尺寸的足够小的场探头。

3.2 吉赫兹横电磁波小室 gigahertz transverse electromagnetic mode cell

吉赫兹横电磁波小室 (gigahertz transverse electromagnetic mode cell, 以下简称 GTEM Cell) 由一个锥形、非对称的矩形同轴线组成，类似于 TEM Cell 的输入部分被延长了的结构。合理选择横截面尺寸使得沿小室长度的特性阻抗保持在 50 Ω 。GTEM Cell 具有比 TEM Cell 更大的操作空间。

3.3 场地电压驻波比 site voltage standing wave ratio

场地电压驻波比是在微波暗室内，将电场探头放置在参考点，沿着同一发射天线的主轴方向改变电场探头的极化和位置，产生相同标准场的情况下，以电场探头示值的最大分散性确定场地电压驻波比。

3.4 各向同性 isotropy

各向同性表征的是场探头随测量角度变化的响应，与入射场的极化和传播方向变化无关。各向同性是按照校准要求改变场探头方向时，场探头在恒定场强下的最高示值与最低示值的比值，通常以分贝表示。

4 概述

电场探头通常由三个部分组成：场传感器、检波器和高阻传输线，基本结构见图 1。场传感器用于探测空间中某一位置的场分量，检波后的信号经处理后可显示场强数值。

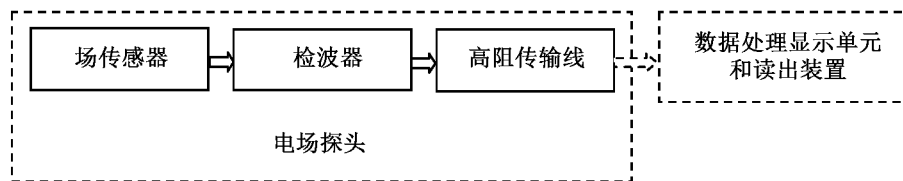


图 1 电场探头的基本结构

电场探头广泛应用于电磁兼容、通信、电力、航天航空、医疗卫生等领域的电磁场测量。

5 计量特性

5.1 电场强度

频率范围：10 MHz～1 GHz；电场强度范围：3 V/m～60 V/m；最大允许误差： ± 2 dB；

频率范围：1 GHz～18 GHz（不包含 1 GHz）；电场强度范围：3 V/m～170 V/m；最大允许误差： ± 2 dB。

5.2 各向同性

最大允许误差： ± 1 dB。

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： $\leq 80\%$ ；
- c) 电源要求： (220 ± 22) V， (50 ± 1) Hz；
- d) 其他：无影响仪器正常工作的电磁干扰及机械振动。

6.2 校准用设备

6.2.1 信号发生器

- a) 频率范围：10 MHz～18 GHz；
- b) 输出功率：不小于 0 dBm；
- c) 频率最大允许误差： $\pm 1 \times 10^{-5}$ 。

6.2.2 功率放大器

- a) 频率范围：10 MHz～18 GHz；
- b) 输出功率： ≥ 20 W；
- c) 谐波抑制： > 20 dB。

6.2.3 定向耦合器

- a) 频率范围：10 MHz～18 GHz；
- b) 耦合系数： $(15 \sim 40)$ dB；
- c) 方向性： ≥ 25 dB；
- d) 电压驻波比： ≤ 1.3 。

6.2.4 功率计

- a) 频率范围：10 MHz~18 GHz；
- b) 功率测量范围：-60 dBm~20 dBm
- c) 电压驻波比： ≤ 1.3 ；
- d) 功率测量最大允许误差： ± 0.15 dB。

6.2.5 微横电磁波小室 (μ TEM Cell)

- a) 10 MHz~1 GHz；
- b) 时域分布阻抗： $50\ \Omega \pm 1\ \Omega$ ；
- c) 端口电压驻波比： ≤ 1.1 ；
- d) 芯板与底板（或顶板）间的距离应大于被校准电场探头直径的3倍。

6.2.6 衰减器

- a) 频率范围：10 MHz~1 GHz；
- b) 衰减值： ≥ 10 dB；
- c) 端口电压驻波比： ≤ 1.1 。

6.2.7 场强传递标准

- a) 频率范围：10 MHz~1 GHz；
- b) 场强测量范围：3 V/m~60 V/m；
- c) 分辨力：0.1 V/m；
- d) 重复性： $\leq 3\%$ ；
- e) 探头尺寸：探头直径不大于 μ TEM Cell 芯板和顶板之间高度的1/5。

6.2.8 吉赫兹横电磁波小室 (GTEM Cell)

- a) 频率范围：10 MHz~1 GHz；
- b) 端口电压驻波比： ≤ 1.2 ；
- c) 时域分布阻抗： $(50 \pm 2)\ \Omega$ ；
- d) 芯板与底板（或顶板）间的距离应大于场强传递标准以及被校准电场探头直径的3倍。

6.2.9 微波暗室

- a) 频率范围：450 MHz~18 GHz；
- b) 内部最小尺寸：4 m（长） $\times$ 2 m（宽） $\times$ 2 m（高）；
- c) 场地电压驻波比： ± 0.5 dB（测量方法参见附录C.2.3）。

6.2.10 标准增益喇叭天线

- a) 频率范围：1 GHz~18 GHz；
- b) 增益： ≥ 15 dB；
- c) 电压驻波比： ≤ 1.5 。

7 校准项目和校准方法

7.1 校准项目

- a) 外观及工作正常性检查；

b) 电场强度；

c) 各向同性。

7.2 校准方法

7.2.1 外观及工作正常性检查

a) 被校电场探头的外观应完好无损，各开关、按键、连接器等工作正常，不应有影响电气性能的机械损伤。被校电场探头配套附件齐全。

b) 按技术说明书规定时间对读出装置和数据处理显示单元预热，预热后应显示正常。

c) 具有自校准功能的读出装置和数据处理显示单元，运行自校准功能，并应显示正常。

d) 将检查结果记录在附录 A 表 A.1 中。

7.2.2 电场强度

7.2.2.1 GTEM Cell 法

a) 适用于 10 MHz~1 GHz。 μ TEM Cell 能够产生可计算的标准场强，利用场强传递标准将 μ TEM Cell 内产生的标准场传递至 GTEM Cell。按图 2 连接仪器设备，组成 μ TEM Cell 校准系统。所有仪器设备通电，按技术说明书规定时间预热。

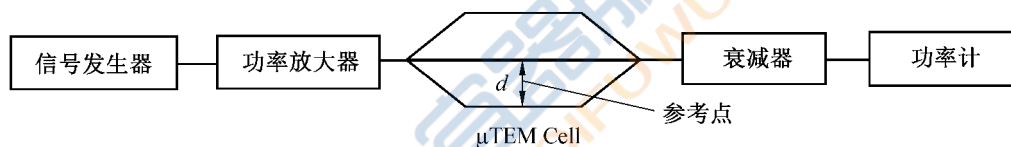


图 2 μ TEM Cell 校准原理图

b) 将场强传递标准放置到 μ TEM Cell 底板（或顶板）到芯板间的中心位置，即参考点位置。设置电场探头为开关开启的工作状态。

c) 设定信号发生器频率为校准频率点，并记录在附录 A 表 A.2 中。

d) 调节信号发生器的输出电平和功率放大器的增益，使得 μ TEM Cell 参考点处的电场强度为标准电场强度值，该值可通过式（1）得到。

$$E = \frac{\sqrt{Z_0 \cdot P_0 \cdot A_f}}{d \cdot \delta V_{\text{SWR}}} \quad (1)$$

式中：

E ——参考点处的标准电场强度，V/m；

Z_0 —— μ TEM Cell 的时域阻抗实部， Ω ；

P_0 ——功率计显示的功率示值，W；

A_f ——衰减器的衰减量；

d ——芯板距离底板（或顶板）的高度，m；

δV_{SWR} ——场地电压驻波比修正因子，一般情况下取保守值 1。

e) 将此时功率计示值、标准场强值和场强传递标准示值记录在附录 A 表 A.2 中。

f) 按图 3 连接仪器预热，组成 GTEM Cell 工作标准。

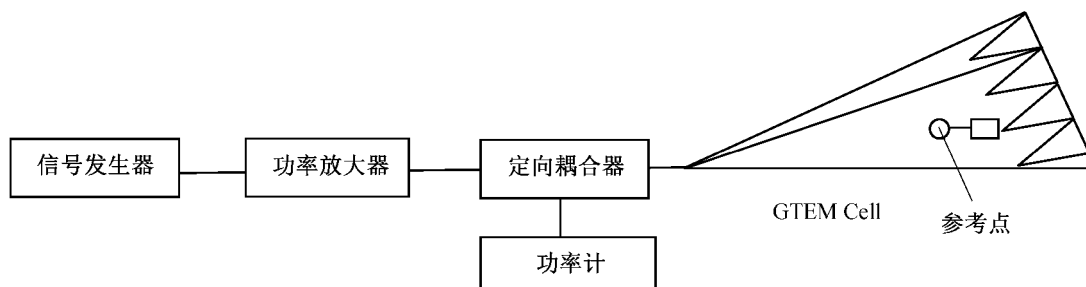


图 3 GTEM Cell 法校准原理图

g) 将场强传递标准的电场探头如图 3 所示放置到 GTEM Cell 中参考点位置。

h) 设定信号发生器频率为校准频率点。

i) 调节信号发生器的输出电平和功率放大器的增益，使得场强传递标准示值与 e) 中的值相同，将此时功率计示值记录在附录 A 表 A.2 中。

j) 将场强传递标准的电场探头从 GTEM Cell 中取出，将被校电场探头几何中心放置在相同位置，调节信号发生器的输出电平和功率放大器的增益使功率计示值达到 i) 的值，将此时被校电场探头示值记录在附录 A 表 A.2 中。

k) 由式 (2) 计算校准因子，并将其记录在附录 A 表 A.2 中。

$$C = E/E_p \quad (2)$$

式中：

C ——校准因子；

E ——参考点的标准场强值，V/m；

E_p ——被校电场探头示值，V/m。

7.2.2.2 微波暗室法

a) 适用于 1 GHz~18 GHz 频段。按图 4 连接仪器，组成校准系统。将仪器设备通电，按技术说明书规定时间预热。

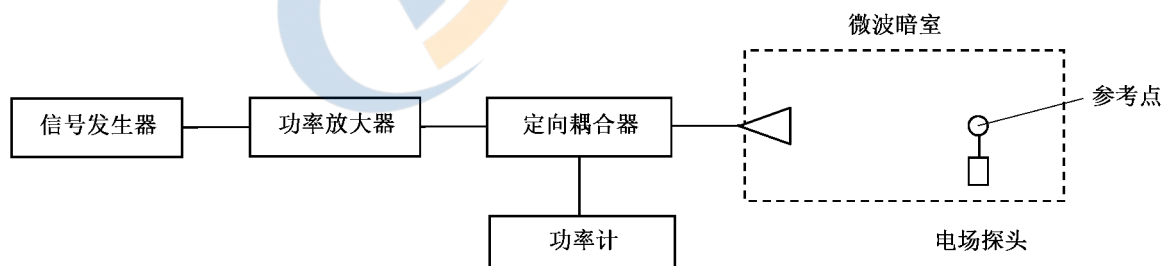


图 4 微波暗室内用标准增益喇叭天线作发射天线法校准原理图

b) 将被校电场探头几何中心放置到微波暗室内发射天线主轴上的参考点位置，且保证探头手柄与电场矢量和传播矢量方向垂直。设置电场探头为开关开启的工作状态。

c) 设定信号发生器频率为校准频率点，并记录在附录 A 表 A.3 中。

d) 调节信号发生器的输出电平和功率放大器的增益，使得参考点位置电场强度为标准电场强度值，该值可通过式 (3) 得到。将此时功率计示值、标准电场强度值和被校电场探头示值记录在附录 A 表 A.3 中。

$$E = \sqrt{\frac{\eta P_{\text{net}} g}{4\pi d^2}} \quad (3)$$

式中：

E ——参考点的电场强度，V/m；

η ——自由空间的波阻抗，377 Ω ；

P_{net} ——馈入发射天线的净功率，W；

g ——参考点处发射天线的增益；

d ——从发射天线到参考点的距离，m。

e) 由式 (2) 计算校准因子，并将其记录在附录 A 表 A.3 中。

7.2.3 各向同性

a) 将 7.2.2.1 中 j) 或 7.2.2.2 中的 b) 的电场探头放置在参考点，调整电场探头方向，使其一个场传感器与入射电场矢量方向相同，可以通过将电场探头手柄沿立方体的对角线放置实现，如图 5 所示。如果制造商并未明确描述场传感器的方位，则应选择并记录能够反映电场探头日常使用中各向同性的轴作为旋转轴。

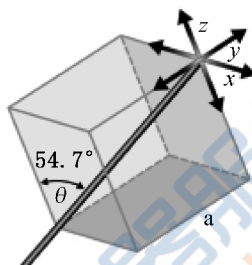


图 5 基于三个正交传感器的电场探头各向同性校准布置

b) 重复 7.2.2.1 中的 j) 和 k) 或者 7.2.2.2 中 c) 和 d)，将校准频率点和标准场强值记录在附录 A 表 A.4 中。

c) 将电场探头围绕旋转轴以最大旋转步进不大于 30° 进行 360° 旋转，得到一组探头响应示值。将所有电场探头响应示值记录在附录 A 表 A.4 中。找出最大、最小响应示值，记录在附录 A 表 A.4 中。

d) 电场探头的各向同性用式 (4) 计算，将 A 的值记录在附录 A 表 A.4 中。

$$A = \pm 20 \log_{10} \left[\frac{E_{P_{\max}}}{\sqrt{E_{P_{\max}} E_{P_{\min}}}} \right] \quad (4)$$

式中：

A ——电场探头各向同性，dB；

$E_{P_{\max}}$ ——电场探头响应示值最大值，V/m；

$E_{P_{\min}}$ ——电场探头响应示值最小值，V/m。

e) 改变校准频率点和标准场强值，重复 a) 到 d)，直至完成所有预设置，可得到电场探头不同频率点的各向同性。

8 校准结果表达

电场探头校准后，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。

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 GTEM 小室法数据记录表格

频率 MHz	芯板距 离底板 (或顶 板) 的 高度 d m	衰减器 的衰减 量 A	时域阻 抗实部 Z_0 Ω	μ TEM 小室功 率计 示值 W	标准 场强值 V/m	场强传 递标准 示值 V/m	GTEM 小室功 率计 示值 W	电场探 头示值 V/m	校准 因子	不确定 度 U ($k=2$) dB
10										
30										
50										
100										
⋮										
900										
1 000										

表 A.3 微波暗室内用标准增益喇叭天线作发射天线法数据记录表格

频率 GHz	发射天线到 参考点的距离 m	天线 增益 dB	功率计 示值 W	标准电场 强度值 V/m	电场探头 示值 V/m	校准 因子	不确定度 $U(k=2)$ dB
1 GHz							
2 GHz							
⋮							
18 GHz							

表 A.4 电场探头各向同性响应数据记录表格

频率 GHz	标准场强值 V/m	相对起始位置 的角度 (°)	电场探头 响应示值 V/m	不确定度 $U(k=2)$ dB
1.8	20	0		
		15		
		30		
		45		
		60		
		⋮		
		300		
		315		
		330		
		345		
		360		
最大响应示值 $E_{\max}$: _____ 最小响应示值 $E_{\min}$: _____				
各向同性: _____ ± _____ dB				

附录 B

校准证书内页格式

表 B.1 电场强度

频率 MHz	标准场强值 V/m	电场探头示值 V/m	校准因子	不确定度 $U(k=2)$ dB

表 B.2 各向同性

频率 MHz	标准场强值 V/m	各向同性 dB	不确定度 $U(k=2)$ dB

附录 C

主要项目校准不确定度评定示例

C.1 电场强度 GTEM Cell 法不确定度评定

C.1.1 测量模型

GTEM Cell 方法适用于 10 MHz~1 GHz 频率范围。GTEM Cell 与 TEM Cell 不同,虽然 GTEM Cell 的内部场强不能够精确计算,但场强大小可以控制且稳定。TEM Cell 通常适用于 200 MHz 以下频段,但经特殊设计的 μ TEM Cell 在频率高达 1 GHz 时仍可产生可计算的标准场强,可作为场强参考标准用于校准不超出其均匀区尺寸的足够小的场探头(或者场传感器),该场探头与配套测量系统一起构成场强传递标准,可以将场强量值传递到具有更大校准空间的场强工作标准 GTEM Cell 内,因此利用 GTEM Cell 可以建立标准场校准电场探头。

依据校准原理,GTEM Cell 法测量模型如式 (C.1):

$$E = \frac{\sqrt{Z_0 \cdot P_0 \cdot A_f}}{d \cdot \delta V_{\text{swr}}} \quad (\text{C.1})$$

式中:

E ——GTEM Cell 内某校准点处的标准场强, V/m;

Z_0 —— μ TEM Cell 的特性阻抗实部,其值为 50 Ω ;

P_0 ——与 μ TEM Cell 连接的功率计显示值, W;

A_f ——衰减器(连接 μ TEM Cell 和功率计)的衰减因子;

d ——芯板距离底板(或顶板)的高度, m;

δV_{swr} ——VSWR 修正因子,一般情况下取保守值 1。

C.1.2 不确定度来源及相对合成标准不确定度计算公式

根据式 (C.1),引入的不确定度分量来源包括:

- 1) μ TEM Cell 阻抗特性引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(Z_0)$;
- 2) 功率测量(在 μ TEM Cell 内)引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(P_0)$;
- 3) 衰减(在 μ TEM Cell 内)测量引入相对不确定度分量 $u_{\text{rel}}(A_f)$;
- 4) μ TEM Cell 芯板与顶板间距的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(d)$;
- 5) μ TEM Cell 端口反射引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta V_{\text{swr}})$ 。

经分析,上述各分量之间彼此不相关,采用相对标准不确定度合成方法得:

$$u_{\text{crel}}^2(E) = 0.5^2 u_{\text{rel}}^2(Z_0) + 0.5^2 u_{\text{rel}}^2(P_0) + 0.5^2 u_{\text{rel}}^2(A_f) + (-1)^2 u_{\text{rel}}^2(d) + (-1)^2 u_{\text{rel}}^2(\delta V_{\text{swr}}) \quad (\text{C.2})$$

由于在测量过程中一些其他非理想因素的影响,引入的不确定度分量包括:

- 6) 场强传递标准引入的相对不确定度分量 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{prob}})$;
- 7) GTEM Cell 内由测试区域场强不均匀引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{unif}})$;
- 8) GTEM Cell 内由方向性引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{corr}})$;

- 9) GTEM Cell 内测试区域阻抗偏离 $50\ \Omega$ 导致的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{impe}})$;
- 10) 温度变化引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{temp}})$;
- 11) 功率测量 (在 GTEM Cell 内) 引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{power}})$;
- 12) 测量重复性引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{Rep}})$ 。

C.1.3 不确定度计算

下面以 10 MHz 频率点, 20 V/m 左右标准场强值为例阐述。

C.1.3.1 μ TEM Cell 阻抗特性引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(Z_0)$

Z_0 表示 μ TEM Cell 中探头位置处的分布特性阻抗, 其大小与 μ TEM Cell 中的驻波相关, 由于 μ TEM Cell 的长度很短, 对其精密测量存在一定困难。因此在这里仅将它作为电压向功率转换的一个内部常量, 所有的电压偏差已经被 δV_{swr} 参数修正, 所以此项不确定度暂且忽略。

C.1.3.2 功率测量 (在 μ TEM Cell 内) 引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(P_0)$

a) 功率计示值引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(P_f)$

10 MHz 功率探头校准因子测量相对扩展不确定度为 $U_{\text{rel}} = 0.044\ \text{dB} (k=2)$, 则

$$u_{\text{rel}}(P_f) = 0.044\ \text{dB} / 2 = 0.022\ \text{dB}$$

b) 功率探头线性引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(P_1)$

10 MHz 功率探头线性测量相对扩展不确定度为 $U_{\text{rel}} = 0.026\ \text{dB} (k=2)$, 则

$$u_{\text{rel}}(P_1) = 0.026\ \text{dB} / 2 = 0.013\ \text{dB}$$

c) 功率探头与同轴精密衰减器间阻抗失配引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(M)$

同轴精密衰减器与功率探头连接, 两者反射系数数据由校准证书可知, 在 10 MHz 频点, 衰减器端口反射系数为 Γ_1 , 功率探头端口反射系数为 Γ_2 , 端口失配误差可利用公式 $\delta_{\text{Mis}} = 1 \pm \Gamma_1 \times \Gamma_2$ 计算, 取最大值得 $20 \times \lg(1 \pm \Gamma_1 \times \Gamma_2) = 0.031\ \text{dB}$, 属于 B 类评定, 服从反正弦分布, 包含因子为 $\sqrt{2}$, 则

$$u_{\text{rel}}(M) = 0.031\ \text{dB} / 1.414 = 0.022\ \text{dB}$$

上述 3 个分量彼此互不相关, 灵敏系数均为 1, 因此, 功率测量的合成相对标准不确定度用下式计算:

$$u_{\text{rel}}(P_0) = \sqrt{u_{\text{rel}}^2(P_f) + u_{\text{rel}}^2(P_1) + u_{\text{rel}}^2(M)} = 0.033\ \text{dB}$$

C.1.3.3 衰减 (在 μ TEM Cell 内) 测量引入相对不确定度分量 $u_{\text{rel}}(A_f)$

连接 μ TEM Cell 和功率计的同轴固定精密衰减器的衰减因子的校准值和扩展不确定度由校准证书获得: $U_{\text{rel}} = 0.03\ \text{dB}$, 属于 B 类不确定度, 服从正态分布, 包含因子为 2, 则 $u_{\text{rel}}(A_f) = 0.03\ \text{dB} / 2 = 0.015\ \text{dB}$ 。

C.1.3.4 μ TEM Cell 芯板与顶板间距的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(d)$

μ TEM Cell 芯板与顶板间距测量值 d 和不确定度 $u(d)$ 来自于校准证书, 服从正态分布, 包含概率为 95.45% 时, 包含因子等于 2。相对标准不确定度: $u_{\text{rel}}(d) = \frac{u(d)}{d} = 0.0005\ \text{dB}$

C.1.3.5 μ TEM Cell 端口反射引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta V_{\text{swr}})$

在 10 MHz~1 GHz 校准频率范围内, 通过校准证书得到最大的反射系数为 0.0148,

反射系数 s_{11i} 分散区间的半宽 $a = 0.0148$ ，且 s_{11i} 落于 $s_{11i} - a$ 至 $s_{11i} + a$ 区间的概率 $p = 100\%$ ，即全部落在此范围中，服从均匀分布，则得 $u_{\text{rel}}(\delta V_{\text{swr}}) = a/k = 0.009 \text{ dB}$ 。

C.1.3.6 场强传递标准引入的相对不确定度分量 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{prob}})$

传递场强标准探头在 μTEM Cell 中的校准结果的不确定度影响由两部分组成，分别是场强测量重复性 $u(\delta_{\text{R}})$ 和探头垂直定位误差 $u(\delta_{\text{VP}})$ ，且互不相关。

a) 场强测量重复性的标准不确定度 $u(\delta_{\text{R}})$

场强测量重复性的不确定度属于 A 类，在重复性条件下对被测量场强 E_i 做 10 次独立测量，单次测量结果 e_{ik} 的标准不确定度为：

$$u(e_{ik}) = s(e_{ik}) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^{n_i} (e_{ik} - e_i)^2}{n_i - 1}} = 0.348 \text{ V/m}$$

实际测量中，采用多次测量的平均值作为测量结果的最佳估计值， $m = 10$ 。

$$u(\delta_{\text{R}}) = s(e_i) = \frac{s(e_{ik})}{\sqrt{m}} = 0.11 \text{ V/m}$$

b) 电场探头垂直定位误差的标准不确定度 $u(\delta_{\text{VP}})$

此项不确定度属于 A 类，接近正态分布，在重复性条件下，将探头偏离中心上下两个极限位置进行两次独立观测，计算结果中的最大值与最小值之差 R （称为极差），其单次测量结果的实验标准差可用极差公式近似评定，进行 6 次独立观测，极差系数 $C = 2.53$ ，垂直定位误差引起的标准不确定度 $u(\delta_{\text{VP}})$ 为：

$$u(\delta_{\text{VP}}) = \frac{R}{C} = 0.25 \text{ V/m}$$

c) 上述 2 个分量彼此不相关，灵敏系数均为 1，因此，场强传递标准 μTEM 小室测量的标准不确定度可用下式计算：

$$u(\delta_{\text{prob}}) = \sqrt{[c_{21} \cdot u(\delta_{\text{R}})]^2 + [c_{22} \cdot u(\delta_{\text{VP}})]^2} = \sqrt{0.11^2 + 0.25^2} = 0.28 \text{ V/m}$$

服从正态分布，包含因子等于 2，其相对不确定度为： $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{prob}}) = \frac{u(\delta_{\text{prob}})}{E_{\text{TEM}}} = 0.116 \text{ dB}$ 。

C.1.3.7 GTEM Cell 内由测试区域场强不均匀引起的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{unif}})$

根据常见被校准电场探头的尺寸，校准测量区域定为 $15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ 的正方体，选取正方体的 8 个边角、6 个面的中心以及正方体中心共 15 个点作为测量位置。记录所有位置处场强测量仪的示值，以中心点为参考点 E_0 ，其他 14 个点中寻找偏离中心值最大电场探头示值 E_{max} 记录下来，利用式 (C.3) 计算出最大误差。

$$S = \frac{|E_{\text{max}} - E_0|}{E_0} \quad (\text{C.3})$$

表 C.1 由测试区域场强不均匀引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{unif}})$ 表

频率 MHz	参考点场强 V/m	偏离参考值 的最大值 V/m	最大相对误差 dB	包含因子	相对标准 不确定度 dB
10	20.1	21.2	0.463	$\sqrt{3}$	0.267

C.1.3.8 GTEM Cell 内由方向性引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{corr}})$

该不确定度考虑的是由于电场探头三个轴向定位误差引入的不确定度。定位误差主要由两种情况引起，第一种是使用钢卷尺测量电场探头几何中心高度，此高度误差限可控制在 $\pm 5 \text{ mm}$ 以内；第二种是探头角度定位误差，该项误差可以通过测量将其控制在 $\pm 5^\circ$ 以内，根据实验可以得到两种情况引入的最大场强偏差。

表 C.2 GTEM Cell 内方向性引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{corr}})$ 表

频率 MHz	场强标准值 V/m	最大场强 偏差值 V/m	相对误差 dB	包含因子	相对标准 不确定度 dB
10	19.97	0.77	0.329	$\sqrt{3}$	0.190

C.1.3.9 GTEM Cell 内测试区域阻抗偏离 50Ω 导致的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{impe}})$

使用 TDR 时域反射计同时对精密同轴空气线和 GTEM Cell 进行校准，在电场探头校准区域，GTEM Cell 特性阻抗相对于精密同轴空气线的最大偏差为 0.4Ω ，阻抗最大相对误差为 0.07 dB ，相对标准不确定度为 $0.07 \text{ dB}/\sqrt{3} = 0.040 \text{ dB}$ 。

根据精密同轴空气线的技术指标，其特性阻抗为 $50 \Omega \pm 0.12 \Omega$ ，用对数表示的相对误差为 $20 \times \lg(1 + 0.12/50) = 0.021 \text{ dB}$ ，相对标准不确定度为 $0.021 \text{ dB}/\sqrt{3} = 0.012 \text{ dB}$ 。小室内测量区域阻抗偏离 50Ω 导致的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{impe}}) = \sqrt{0.04^2 + 0.012^2} = 0.042 \text{ dB}$ 。

C.1.3.10 温度变化引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{temp}})$

对场强传递标准进行定期校准，并将温度修正系数输入系统用以修正温度带来的影响。根据经验，环境温度变化引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{temp}})$ 不超过 0.05 dB 。

C.1.3.11 功率测量（在 GTEM Cell 内）引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{power}})$

功率测量的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{power}})$ 是由功率测量频率响应相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(P_f)$ 、功率测量线性相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(P_l)$ 以及功率探头与双定向耦合器间阻抗失配的相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(M)$ 这 3 个分量的合成。

功率测量频率响应相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(P_f)$ 和功率测量线性相对标准不确定度 $u_{\text{rel}}(P_l)$ 均来自校准证书，正态分布，包含概率为 95.45% 时，包含因子为 2，则得

$$u_{\text{rel}}(P_f) = 0.044 \text{ dB}/2 = 0.022 \text{ dB}, u_{\text{rel}}(P_l) = 0.026 \text{ dB}/2 = 0.013 \text{ dB}$$

阻抗失配引起的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(M)$ 分两项，第一项是 GTEM Cell 与双定向耦合器功率输出端口 J2 之间的阻抗失配，第二项是功率探头与双定向耦合器前向功率监测端口 J3 间的阻抗失配。

双定向耦合器与 GTEM Cell 间的失配相对不确定度为：

$$u_{\text{rel}}(M_{\text{TEM}}) = \frac{|20 \lg(1 \pm \Gamma_l \cdot \Gamma_s)|}{\sqrt{2}} = 0.056 \text{ dB}$$

双定向耦合器正向功率监测端口 J3 与功率探头间的失配相对不确定度为：

$$u_{\text{rel}}(M_{J2}) = \frac{|20 \lg(1 \pm \Gamma_l \cdot \Gamma_s)|}{\sqrt{2}} = 0.210 \text{ dB}$$

其中 Γ_s 为源反射系数； Γ_l 为负载反射系数。

失配的相对不确定度为：

$$u_{\text{rel}}(M) = \sqrt{u_{\text{rel}}^2(M_{\text{TEM}}) + u_{\text{rel}}^2(M_{\text{J2}})} = 0.217 \text{ dB}$$

则功率测量的相对不确定度为：

$$u_{\text{rel}}(\delta_{\text{power}}) = \sqrt{u_{\text{rel}}^2(P_f) + u_{\text{rel}}^2(P_l) + u_{\text{rel}}^2(M)} = 0.219 \text{ dB}$$

C.1.3.12 测量重复性引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{Rep}})$

利用同一个电场探头在 10 MHz，20 V/m 左右标准场强下重复测量 10 次，得到平均场强值为 24.0 V/m，测量重复性引入的不确定度 $u(\delta_{\text{Rep}}) = 0.760 \text{ V/m}$ ，相对不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{Rep}}) = 0.271 \text{ dB}$ 。

C.1.4 相对合成标准不确定度

电场强度 GTEM Cell 法相对不确定度分量汇总表如表 C.3 所示。

表 C.3 电场强度 GTEM Cell 法的相对不确定度汇总表(频率:10 MHz)

不确定度来源		值 dB	分布	包含 因子	灵敏系数 c_i	标准不确定 度分量 dB
μ TEM Cell 阻抗特性		0	均匀	1.732	0.5	0
功率测量（在 μ TEM Cell 内）		0.033	正态	1	0.5	0.017
衰减（在 μ TEM Cell 内）		0.015	正态	1	0.5	0.074
μ TEM Cell 芯板与顶板间距		0.000 5	正态	1	—1	0.001
μ TEM Cell 端口反射		0.014 8	均匀	1.732	—1	0.009
场强传递标准		0.116	正态	1	1	0.116
GTEM Cell 测试区域场强不均匀		0.463	均匀	1.732	——	0.267
GTEM Cell 方向性影响		0.329	均匀	1.732	——	0.190
GTEM Cell 内测试 区域阻抗偏离	同轴空气线特性阻抗 引入	0.070	均匀	1.732	——	0.040
	GTEM Cell 特性阻 抗最大偏差	0.021	均匀	1.732	——	0.012
温度变化		0.050	正态	1	——	0.050
功率测量（在 GTEM Cell 内）		0.219	正态	1	——	0.219
测量重复性		0.271	正态	1	——	0.271

以上各项标准不确定度分量互不相关，相对合成标准不确定度为：

$$u_{\text{crel}}(E) \approx 0.5 \text{ dB}$$

C.1.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，相对扩展不确定度为：

$$U_{\text{rel}} = k \cdot u_{\text{crel}}(E) = 1.0 \text{ dB} \quad (k=2)$$

C.2 电场强度微波暗室法不确定度评定

C.2.1 测量模型

如果利用定向耦合器计算馈入到发射天线的净功率的连接如图 C.1 所示，则馈入到喇叭天线的净功率可以用式 (C.4) 计算：

$$P_{\text{net}} = P_r \cdot C_0 \cdot M_3 \cdot \frac{1}{S_{31}} \cdot S_{21} \cdot M_2 \quad (\text{C.4})$$

式中：

P_r ——功率计探头示值；

C_0 ——功率探头示值线性的修正因子；

S_{31} ——定向耦合器的耦合系数；

S_{21} ——定向耦合器输出端 2 和输入端 1 间的插入损耗；

M_3 和 M_2 ——端口 3 和端口 2 的失配因子，可以用式 (C.5) 计算：

$$M = \frac{1}{|1 - \Gamma_L \Gamma_G|^2} \quad (\text{C.5})$$

其中， Γ_L 为负载反射系数； Γ_G 为源反射系数。

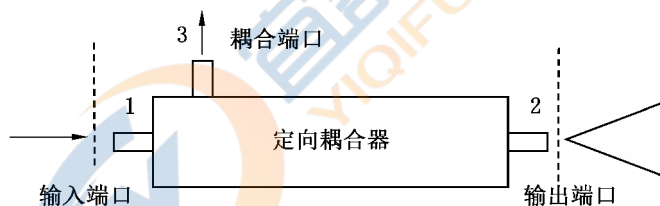


图 C.1 定向耦合器与喇叭天线连接示意图

依据校准原理，微波暗室法测量电场强度的测量模型如式 (C.6)：

$$E = \sqrt{\frac{\eta g}{4\pi d^2} \cdot P_r \cdot C_0 \cdot M_3 \cdot \frac{1}{S_{31}} \cdot S_{21} \cdot M_2} \quad (\text{C.6})$$

式中：

E ——参考点的电场强度，V/m；

η ——自由空间的波阻抗，377 Ω ；

g ——参考点处发射天线的增益；

d ——从发射天线到参考点的距离，m；

P_r ——功率计探头示值，W；

C_0 ——功率探头示值线性的修正因子；

M_3 ——定向耦合器端口 3 的失配因子；

S_{31} ——定向耦合器的耦合系数；

S_{21} ——定向耦合器的插入损耗；

M_2 ——定向耦合器端口 2 的失配因子。

C.2.2 不确定度来源及相对合成不确定度计算公式

依据式 (C.6) 分析, 引入的不确定度分量来源包括:

- 1) 标准增益喇叭天线增益测量引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(g)$;
- 2) 发射天线口面到参考点的距离引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(d)$;
- 3) 功率计示值引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(P_r)$;
- 4) 功率探头线性引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(C_0)$;
- 5) 定向耦合器耦合端口连接处的失配引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(M_3)$;
- 6) 定向耦合器耦合系数校准引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(S_{31})$;
- 7) 定向耦合器插入损耗校准引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(S_{21})$;
- 8) 定向耦合器输出端口连接处的失配引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(M_2)$;

经分析, 上述各分量之间彼此不相关, 采用相对标准不确定度合成方法得:

$$\begin{aligned} u_{\text{crel}}^2(E) = & 0.5^2 u_{\text{rel}}^2(g) + (-1)^2 u_{\text{rel}}^2(d) + 0.5^2 u_{\text{rel}}^2(P_r) + 0.5^2 u_{\text{rel}}^2(C_0) \\ & + 0.5^2 u_{\text{rel}}^2(M_3) + (-0.5)^2 u_{\text{rel}}^2(S_{31}) + 0.5^2 u_{\text{rel}}^2(S_{21}) \\ & + 0.5^2 u_{\text{rel}}^2(M_2) \end{aligned} \quad (\text{C.7})$$

由于在测量过程中一些其他非理想因素的影响, 引用的不确定度分量包括:

- 9) 间距测量引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{Spac}})$;
- 10) 对准测量引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{Align}})$;
- 11) 残余地面反射引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{Ref}})$;
- 12) 同轴电缆发热引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{Therm}})$;
- 13) 同轴电缆绕曲引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{Flex}})$;
- 14) 多路径反射引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{SVSWR}})$;
- 15) 探头固定设备引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{Master}})$;
- 16) 测量重复性引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{Rep}})$ 。

C.2.3 不确定度计算

以 1.8 GHz 频率点, 20 V/m 左右场强值为例进行不确定度评定计算。

C.2.3.1 标准增益喇叭天线增益测量引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(g)$

在 1.8 GHz 频点, 标准增益喇叭天线增益测量的扩展不确定度为 0.50 dB ($k=2$), 得

$$u_{\text{rel}}(g) = 0.50 \text{ dB} / 2 = 0.25 \text{ dB}$$

C.2.3.2 发射天线口面到参考点的距离引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(d)$

使用激光测距仪测量天线口面到探头中心的距离, 校准证书给出, 校准系数为 -1.00 mm , 校准系数的扩展不确定度为 0.3 mm ($k=2$)。考虑到实际使用时, 无法精准定位电场探头几何中心, 估计距离测量值的误差限为 $\pm 1 \text{ cm}$, 服从均匀分布, 则 1.8 GHz 距离测量的最大允许误差为 $20 \times \lg(1 \pm 1/160) = \pm 0.054 \text{ dB}$, 服从均匀分布,

$$\text{则 } u_{\text{rel}}(d) = \frac{0.054 \text{ dB}}{\sqrt{3}} = 0.0314 \text{ dB}。$$

C.2.3.3 功率计示值引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(P_r)$

1.8 GHz 功率探头校准因子测量扩展不确定度为 0.088 dB ($k=2$), 则

$$u_{\text{rel}}(P_r) = 0.088 \text{ dB}/2 = 0.044 \text{ dB}$$

C.2.3.4 功率探头线性引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(C_0)$

1.8 GHz 功率探头线性测量扩展不确定度为 0.025 dB($k=2$)，则

$$u_{\text{rel}}(C_0) = 0.025 \text{ dB}/2 = 0.0125 \text{ dB}$$

C.2.3.5 定向耦合器耦合端口连接处的失配引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(M_3)$

定向耦合器耦合端口与功率探头连接，两者反射系数数据由校准证书可知，在 1.8 GHz 频点，耦合器耦合端口反射系数为 Γ_1 ，功率探头端口反射系数为 Γ_2 ，端口失配误差得 $20 \times \lg(1 \pm \Gamma_1 \times \Gamma_2) = \pm 0.008 \text{ dB}$ ，服从反正弦分布，则

$$u_{\text{rel}}(M_3) = 0.008 \text{ dB}/1.414 = 0.006 \text{ dB}$$

C.2.3.6 定向耦合器耦合系数校准引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(S_{31})$

由校准证书可知，定向耦合器 1.8 GHz 频点耦合系数校准扩展不确定度为 0.20 dB ($k=2$)，则

$$u_{\text{rel}}(S_{31}) = 0.20 \text{ dB}/2 = 0.10 \text{ dB}$$

C.2.3.7 定向耦合器插入损耗校准引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(S_{21})$

由校准证书可知，定向耦合器 1.8 GHz 频点插入损耗校准扩展不确定度为 0.10 dB ($k=2$)，则

$$u_{\text{rel}}(S_{21}) = 0.10 \text{ dB}/2 = 0.05 \text{ dB}$$

C.2.3.8 定向耦合器输出端口连接处的失配引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(M_2)$

定向耦合器输出端口与标准增益喇叭天线连接，两者反射系数数据由校准证书可知，在 1.8 GHz 频点，耦合器输出端口反射系数为 Γ_1 ，天线馈入端口反射系数为 Γ_2 ，端口失配误差得 $20 \times \lg(1 \pm \Gamma_1 \times \Gamma_2) = \pm 0.032 \text{ dB}$ ，服从反正弦分布，则

$$u_{\text{rel}}(M_2) = 0.032 \text{ dB}/1.414 = 0.023 \text{ dB}$$

C.2.3.9 间距测量引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{Spac}})$

发射天线馈入相同净功率的情况下，该不确定度是通过测量被校探头放置在发射天线主轴上与参考点间距 $\pm 2 \text{ cm}$ 的场强值与参考点处的场强值间的最大偏差来获得。最大偏差为 0.154 dB，服从均匀分布，则相对标准不确定度为 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{Spac}}) = 0.154 \text{ dB}/1.732 = 0.089 \text{ dB}$ 。

C.2.3.10 对准测量引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{Align}})$

校准电场探头时，被校探头放置偏离发射喇叭天线轴线将引入不确定度。该不确定度可以通过测量被校探头位于与发射天线主轴垂直面上垂直地面和平行地面两个方向上偏移 $\pm 2 \text{ cm}$ 与参考点处的最大偏差获得。最大偏差分别为 0.086 dB 和 0.068 dB，服从均匀分布，则两种情况相对标准不确定度分别为： $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{Align-1}}) = 0.086 \text{ dB}/1.732 = 0.050 \text{ dB}$ ， $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{Align-2}}) = 0.068 \text{ dB}/1.732 = 0.039 \text{ dB}$ 。则

$$u_{\text{rel}}(\delta_{\text{Align}}) = \sqrt{u_{\text{rel}}^2(\delta_{\text{Align-1}}) + u_{\text{rel}}^2(\delta_{\text{Align-2}})} = \sqrt{0.050^2 + 0.039^2} = 0.063 \text{ dB}。$$

C.2.3.11 残余地面反射引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{Ref}})$

尽管电场强度校准系统和被校探头均放在全电波暗室内，理想情况下暗室内各个面的反射很小，可比拟自由空间。实际校准时，被校电场探头除了接受来自发射天线的直射波外，还有来自地面以及其他面的反射波。评价由残余地面反射引入的不确定度的具

体做法：保持参考点处的标准场不变的情况下，将吸波材料放在发射喇叭天线与被校探头之间的地面上，在几个不同位置上放置吸波材料，参考点处电场探头的示值几乎没有变化，因此，忽略此项误差引入的不确定度。

C. 2. 3. 12 同轴电缆发热引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{Therm}})$

发射喇叭天线通常需要馈入较大功率信号，若发射天线和定向耦合器间用低损耗电缆连接，电缆发热会产生一定的能量损耗，此项不确定度需要评估。由于校准系统中定向耦合器输出端口直接与发射喇叭天线相连，则有效避免了同轴电缆发热引入的不确定度。

C. 2. 3. 13 同轴电缆绕曲引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{Flex}})$

同 C. 2. 3. 12，由于定向耦合器直接与发射喇叭天线相连，避免了因同轴电缆绕曲带来的影响。

C. 2. 3. 14 多路径反射引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{SVSWR}})$

多路径反射不确定度可以用由非理想暗室环境反射引起的驻波来评价。IEEE 1309—2013 标准推荐用于探头校准的全电波暗室最小尺寸（即内部工作空间）是 4 m（长）× 2 m（宽）× 2 m（高），暗室的场地电压驻波比应该小于 ± 0.5 dB。

场地电压驻波比测量方法：

将电场探头放置在参考点，沿着发射天线的主轴方向改变电场探头的极化和位置，以确定场地电压驻波比。测量中应该使用同一个发射天线。测量布置见图 C. 2，其中 L_0 是从发射天线口面到电场探头参考点的距离，将电场探头的几何中心放在参考点位置 0。表 C. 4 列出了电场探头沿天线主轴方向移动所推荐的最大步进距离 ΔL 和推荐的距离参考点的最小总距离 L 。

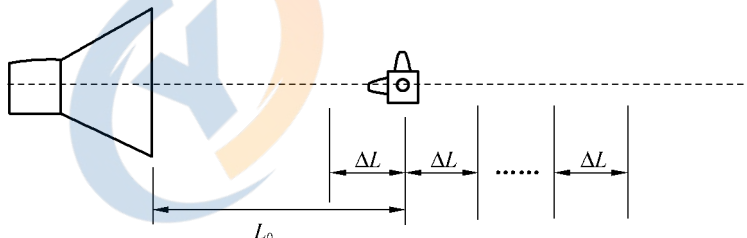


图 C. 2 微波暗室场地驻波的测量布置

表 C. 4 电场探头移动的最大步进距离和最小总距离

频率 f/GHz	最大步进距离 $\Delta L/\text{cm}$	最小总距离 L/cm
<2	5	± 30
$2\sim 4$	2.5	± 15
$4\sim 8$	1.25	± 7.5
>8	1	± 6

标准增益喇叭天线的增益是距离的函数，不是常量，应在每一个位置确定天线增益。基于每个位置的天线增益，通过改变馈入发射天线的净功率，确保在所有位置产生大小一样的场，例如，20 V/m。使发射天线和电场探头都处于垂直极化，记录所有位

置和所有频率的探头示值。将天线和探头都处于水平极化重复测量。在每个频率，示值的最大分散性（即场地电压驻波比）应该小于 ± 0.5 dB。

在 1.8 GHz 频点，移动的 12 个位置与参考点位置相比的场强值最大偏差为 0.495 dB，服从均匀分布，则相对标准不确定度为 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{SVSWR}}) = 0.495 \text{ dB}/1.732 = 0.286 \text{ dB}$ 。

C.2.3.15 探头固定设备引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{Master}})$

发射天线馈入相同净功率的情况下，在参考点用泡沫聚苯乙烯支撑物和探头固定设备分别支撑相同被校电场探头，以探头的示值偏差来评价探头固定设备引入的不确定度。在 1.8 GHz 频点，产生 20 V/m 左右的恒定标准场强，测得示值偏差为 0.265 dB，服从均匀分布，则相对标准不确定度为 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{Master}}) = 0.265 \text{ dB}/1.732 = 0.153 \text{ dB}$ 。

C.2.3.16 测量重复性引入的相对不确定度 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{Rep}})$

在 1.8 GHz 频率下，产生 20 V/m 左右的恒定标准场强，利用同一个电场探头重复测量 10 次，测量重复性引入的不确定度 $u(\delta_{\text{Rep}}) = 0.146 \text{ V/m}$ ，相对不确定度为 $u_{\text{rel}}(\delta_{\text{Rep}}) = 0.066 \text{ dB}$ 。

C.2.4 相对合成标准不确定度

电场强度微波暗室法不确定度分量汇总如表 C.5 所示。

表 C.5 电场强度微波暗室法 1.8 GHz 不确定度分量汇总表

序号	不确定度来源	值 dB	分布	包含 因子	灵敏 系数 c_i	标准不确定 分量/dB
1	标准增益喇叭天线增益 g 测量	0.50	正态	2	0.5	0.13
2	发射天线口面到参考点距离 d 测量	± 0.054	均匀	1.732	-1	0.03
3	功率计示值 P_r 测量	0.088	正态	2	0.5	0.02
4	功率探头线性 C_0 测量	0.025	正态	2	0.5	0.01
5	定向耦合器耦合端口连接处失配 M_3	0.008	反正弦	1.414	0.5	0.003
6	定向耦合器耦合系数 S_{31} 校准	0.20	正态	2	-0.5	0.05
7	定向耦合器插入损耗 S_{21} 校准	0.10	正态	2	0.5	0.03
8	定向耦合器输出端口连接处失配 M_2	0.032	反正弦	1.414	0.5	0.01
9	间距测量	± 0.154	均匀	1.732	——	0.09
10	对准测量	± 0.086	均匀	1.732	——	0.06
11	残余地面反射	0.00	均匀	1.732	——	0.00
12	同轴电缆发热	0.00	均匀	1.732	——	0.00
13	同轴电缆绕曲	0.00	均匀	1.732	——	0.00
14	多路径反射	± 0.495	均匀	1.732	——	0.29
15	探头固定设备	± 0.265	均匀	1.732	——	0.15
16	测量重复性	0.07	正态	1	——	0.07

以上各项标准不确定度分量互不相关，所以相对合成标准不确定度为：

$$u_{\text{crel}}(E) \approx 0.38 \text{ dB}$$

C.2.5 扩展不确定度

取包含因子 $k=2$ ，相对扩展不确定度为：

$$U_{\text{rel}} = k \cdot u_{\text{crel}}(E) = 0.76 \text{ dB} (k=2)$$

