

# 一种基于单定向耦合器的净馈入功率测量方法



林浩宇, 黄攀, 谢晶, 刘志鹏

中国计量科学研究院, 北京 100029

**【摘要】** 为解决无线电计量领域中的净馈入功率测量问题, 提出了一种基于单定向耦合器且考虑失配修正的净馈入功率测量方法, 并开展了不确定度评定。首先, 根据微波网络理论并结合单定向耦合器信号流图, 推导出了净馈入功率表达式; 其次, 开展了两项测量实验以验证所提出的测量方法, 实验结果表明, 利用该方法计算净馈入功率其典型误差不超过 0.1 dB, 且受阻抗失配影响较小。实验同时还证明了该方法适用于电场探头校准, 能够减小由于净馈入功率测量误差所导致的标准场误差。最后, 利用蒙特卡罗法进行了不确定度评定, 结果表明利用该方法测量净馈入功率, 其典型标准不确定度小于 1.3%。该净馈入功率测量方法具有精度高、计算过程简便等优点, 在以场强计量为代表的无线电计量领域中有着良好的应用前景。

**【关键词】** 计量学; 单定向耦合器; 净馈入功率测量; 失配修正; 精密测量; 不确定度

**【中图分类号】** TB973

**【文献标识码】** A

**【文章编号】** 2096-9015(2024)05-0011-06

**DOI:** 10.12338/j.issn.2096-9015.2024.0083

**【引用本文】** 林浩宇, 黄攀, 谢晶, 等. 一种基于单定向耦合器的净馈入功率测量方法 [J]. 计量科学与技术, 2024, 68(5): 11-16, 76.

## A Net Power Measurement Method Based on a 3-Port Directional Coupler

LIN Haoyu, HUANG Pan, XIE Jing, LIU Zhipeng

National Institute of Metrology, Beijing 100029, China

**【Abstract】** To address the issue of net power measurement in the field of radio frequency (RF) metrology, a method based on a 3-port directional coupler with mismatch correction is proposed, and the associated uncertainty evaluation is performed. First, the net power calculation equation is rigorously derived using microwave network theory according to the signal flow graph. Second, two experiments are conducted to validate this method. The results show that when using the proposed method to calculate the net power, the typical error is less than 0.1 dB, and it is less affected by impedance mismatch. Furthermore, the experiments demonstrate that the proposed method is suitable for electric field (E-field) probe calibration, as it can reduce the standard E-field strength error caused by the net power measurement. Finally, the uncertainty is evaluated using the Monte Carlo method, and the results indicate that the typical relative standard uncertainty is less than 1.3% when measuring net power using this method. The proposed net power measurement method has the advantages of high accuracy and a simple calculation process, and it has good application prospects in the field of RF metrology, particularly in E-field strength metrology.

**【Key words】** metrology, 3-port directional coupler, net power measurement, mismatch correction, precision measurement, uncertainty

## 0 引言

净馈入功率测量是无线电计量领域中经常遇到的一个问题, 涉及电场探头校准、天线测量以及电

磁兼容测试等方面<sup>[1-12]</sup>。

刘潇等提出了一种基于双定向耦合器的净馈入功率测量方法, 可以测量电场探头校准过程中馈入

收稿日期: 2024-03-13; 修回日期: 2024-04-09

基金项目: 质量技术基础能力建设 (ANL2306)。

作者简介: 林浩宇 (1986-), 中国计量科学研究院副研究员, 研究方向: 场强及电磁兼容计量技术研究、场强标准装置研制, 邮箱: linhy@nim.ac.cn。

到 TEM 室中的净功率, 如图 1 所示<sup>[13]</sup>。分别利用两个功率探头测量前向和反向功率, 净馈入功率可由式(1)得到。

$$P_{\text{net}} = C_3 P_3 - C_4 P_4 \quad (1)$$

式中,  $P_3$  和  $P_4$  是前、后两功率探头的读数;  $C_3$  和  $C_4$  是定向耦合器的前向和后向耦合系数。



图 1 双定向耦合器示意图

Fig.1 The schematic diagram of the dual directional coupler

$$C_3 = \left| \frac{S_{21}}{S_{31}} \right|^2 \quad (2)$$

$$C_4 = \left| \frac{1}{S_{42}} \right|^2 \quad (3)$$

然而, 式(1)虽然形式简单且经常应用于工程计算, 但它仅仅是一个理想无失配情况下的近似表达式。由于在测量过程中不可避免的会出现阻抗失配现象并对测量结果造成影响, 因此对于精密测量或者对测量精度有较高要求的场合, 式(1)并不适用。

M. Kanda 等推导了基于双定向耦合器且考虑了失配修正的确切的净馈入功率表达式( $P_{\text{exact}}$ ), 如式(4)所示<sup>[14-16]</sup>。

$$P_{\text{exact}} = P_3 |g|^2 - P_4 |\Gamma_2|^2 |h|^2 \quad (4)$$

$$g = \frac{F_1 B_1 + A_1 E_1}{D_1 A_1 - F_1 C_1} \quad (5)$$

$$h = \frac{B_1 F_1 + A_1 E_1}{B_1 D_1 + E_1 C_1} \quad (6)$$

$$A_1 = S_{31} (1 - S_{44} \Gamma_4) + S_{34} S_{41} \Gamma_4 \quad (7)$$

$$B_1 = S_{41} (1 - S_{33} \Gamma_3) + S_{34} S_{31} \Gamma_3 \quad (8)$$

$$C_1 = (S_{31} S_{42} - S_{32} S_{41}) \Gamma_2 \quad (9)$$

$$D_1 = S_{31} (1 - S_{22} \Gamma_2) + S_{32} S_{12} \Gamma_2 \quad (10)$$

$$E_1 = S_{12} (1 - S_{33} \Gamma_3) + S_{31} S_{32} \Gamma_3 \quad (11)$$

$$F_1 = (S_{31} S_{42} - S_{34} S_{12}) \Gamma_4 \quad (12)$$

式中,  $\Gamma_2$  为端口 2 所接负载的反射系数(RC);  $\Gamma_3$  和

$\Gamma_4$  是端口 3、4 所接功率探头的反射系数。上式中的  $S$  参数为双定向耦合器的  $S$  参数。通过观察式(4)~式(12)可以发现,  $P_{\text{exact}}$  的表达式极其复杂, 且项数远多于式(1), 因此用其计算净馈入功率非常不便。

M. Takehiro 利用仿真模型, 基于被测设备(DUT)的反射系数针对 DUT 净馈入功率的系统误差和随机误差开展了研究, 推导了反射计定标系数的完整表达式, 给出了净馈入功率的计算公式<sup>[17]</sup>。

李大博等比较了两种净馈入功率测量方法, 一种是基于双定向耦合器及其标量耦合系数、驻波比(VSWR)及方向性的计算方法, 另一种是可溯源至功率标准的传递法, 此外还给出了如何选择这两种方法的原则<sup>[18]</sup>。

为了保证净馈入功率测量的准确性, 上述所有基于双定向耦合器的方法都要求耦合器为具有高方向性的理想或准理想耦合器。除此之外, 根据国际标准 IEEE 1309-2013, 当双定向耦合器的 2 端口接有一个驻波比为 1.5:1 的发射天线, 且定向耦合器的方向性为 25 dB 时, 由于有限的方向性所导致的净馈入功率测量不确定度为 +0.19/-0.22 dB, 呈 U 型分布<sup>[19]</sup>。对于净功率测量而言该量级的不确定度是不可忽略的, 在有些场景下甚至可能会成为主要不确定度分量。

事实上, 单定向耦合器同样可以用于考虑失配修正的净馈入功率测量, 这样由双定向耦合器方向性所导致的问题就不复存在, 且净馈入功率表达式要比双定向耦合器更为简洁, 更便于应用。

本文提出了一种基于单定向耦合器的考虑失配修正的高精度净馈入功率测量方法, 通过测量实验对该方法进行了验证, 并开展了不确定度评定。

## 1 测量方法

耦合端接有功率探头、输出端接有负载的单定向耦合器信号流图如图 2 所示。

图中,  $E$  为信号发生器(SG)输出的信号幅度值;  $\Gamma_G$ 、 $\Gamma_S$  以及  $\Gamma_L$  分别为信号发生器、功率探头以及负载的反射系数,  $S$  参数为耦合器的  $S$  参数。根据图 2 并利用微波网络原理可得式(13)及式(14)<sup>[20]</sup>。

$$b_2 = b_3 \left[ \frac{S_{21}}{S_{31}} + \Gamma_S \left( S_{23} - \frac{S_{21} S_{33}}{S_{31}} \right) \right] + a_2 \left( S_{22} - \frac{S_{21} S_{32}}{S_{31}} \right) \quad (13)$$

$$a_2 = b_2 \Gamma_L \quad (14)$$

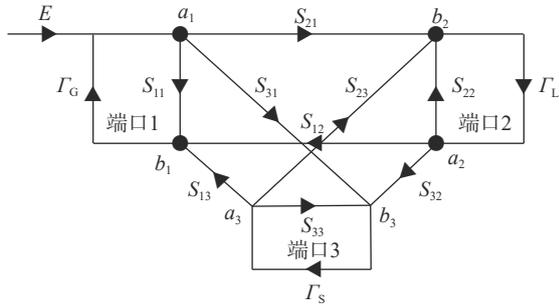


图 2 单定向耦合器的信号流图  
Fig.2 The signal flow graph for a 3-port directional coupler

将式(14)代入式(13)并消掉  $a_2$  可得:

$$b_2 = b_3 \left[ \frac{S_{21}}{S_{31}} + \Gamma_S \left( S_{23} - \frac{S_{21}S_{33}}{S_{31}} \right) \right] \times \frac{1}{1 - \Gamma_L \left( S_{22} - \frac{S_{21}S_{32}}{S_{31}} \right)} \quad (15)$$

$P_{\text{net}}$  为负载接收到的净馈入功率,其表达式如式(16)。

$$P_{\text{net}} = \frac{|b_2|^2}{Z_0} - \frac{|a_2|^2}{Z_0} \quad (16)$$

式中,  $Z_0$  为传输线特性阻抗。

将式(14)、式(15)代入式(16)可得:

$$P_{\text{net}} = \frac{|b_3|^2}{Z_0} \left| \frac{S_{21}}{S_{31}} + \Gamma_S \left( S_{23} - \frac{S_{21}S_{33}}{S_{31}} \right) \right|^2 \times \frac{1 - |\Gamma_L|^2}{\left| 1 - \Gamma_L \left( S_{22} - \frac{S_{21}S_{32}}{S_{31}} \right) \right|^2} \quad (17)$$

功率探头接收到的功率为  $P_S$ ,其表达式如下,

$$P_S = \frac{|b_3|^2}{Z_0} - \frac{|a_3|^2}{Z_0} \quad (18)$$

$$a_3 = b_3 \Gamma_S \quad (19)$$

将式(18)、式(19)代入式(17)并消掉  $a_3$ 、 $b_3$  可得式(20),这是考虑了失配修正之后负载接收到的净馈入功率的最终表达式。

$$P_{\text{net}} = \frac{P_S}{1 - |\Gamma_S|^2} \times \left| \frac{S_{21}}{S_{31}} + \Gamma_S \left( S_{23} - \frac{S_{21}S_{33}}{S_{31}} \right) \right|^2 \times \frac{1 - |\Gamma_L|^2}{\left| 1 - \Gamma_L \left( S_{22} - \frac{S_{21}S_{32}}{S_{31}} \right) \right|^2} \quad (20)$$

式中,  $P_S$  为功率探头读数,各  $S$  参数及反射系数可由矢量网络分析仪测得,式中所有参数的获取过程简便、快捷,不涉及复杂测量及运算。

通过观察式(20)可以发现,该式等号右侧可分为三部分:第一部分是  $\frac{P_S}{1 - |\Gamma_S|^2}$ ,该项是考虑了功率探头的失配并进行修正后端口 3 输出的前向耦合功率,如果不考虑功率探头的失配(即  $\Gamma_S = 0$ ),则该项变为  $P_S$ ;第二部分为  $\left| \frac{S_{21}}{S_{31}} + \Gamma_S \left( S_{23} - \frac{S_{21}S_{33}}{S_{31}} \right) \right|^2$ ,该项是针对单定向耦合器插入损耗与耦合系数比值的修正,同样如果不考虑功率探头的失配(即  $\Gamma_S = 0$ ),则该项变为  $\left| \frac{S_{21}}{S_{31}} \right|^2$ ;第三部分为  $\frac{1 - |\Gamma_L|^2}{\left| 1 - \Gamma_L \left( S_{22} - \frac{S_{21}S_{32}}{S_{31}} \right) \right|^2}$ ,这是针对负载失配的修正,如果不考虑负载失配(即  $\Gamma_L = 0$ ),则该项等于 1。如果上述所有失配均不考虑,则净馈入功率表达式变为:

$$P_{\text{net}} = P_S \left| \frac{S_{21}}{S_{31}} \right|^2 \quad (21)$$

该式为利用单定向耦合器计算净馈入功率时常用的近似表达式。

通过以上分析可以发现,本文所推导的净馈入功率表达式考虑了测量过程中所涉及的所有失配对于净馈入功率测量结果的影响,式(20)是基于单定向耦合器进行净馈入功率测量的全面、确切的结果表达式。

## 2 测量实验

本节详细介绍了所开展的两个测量实验的相关内容及其结果。实验(a)的目的是通过比较不同测量方法得到的净馈入功率测量结果与参考净功率之间的差值,验证本文所提出的测量方法。实验(b)的目的是展示所提出的净馈入功率测量方法在电场探头校准中的应用,同时揭示使用不同的净馈入功率测量方法对电场探头校准结果的影响。

### 2.1 实验(a):净馈入功率测量验证实验

在该实验中使用了一个标称耦合系数为 20 dB 的双定向耦合器以及三个功率探头,实验布置如图 3 所示。

端口 1 与信号源相连,该信号源配有高功率选件可实现 +30 dBm 功率输出。编号为 PS0 的功率探头与端口 2 相连,此时其相当于一个“负载”,可以通过 PS0 的读数得到“负载”所吸收的净馈入功率,即参考净功率  $P_{\text{net0}}$ 。端口 3 和 4 分别与编号为 PS1 和 PS2 的另两个功率探头相连,分别用于测量前向和反向功率。

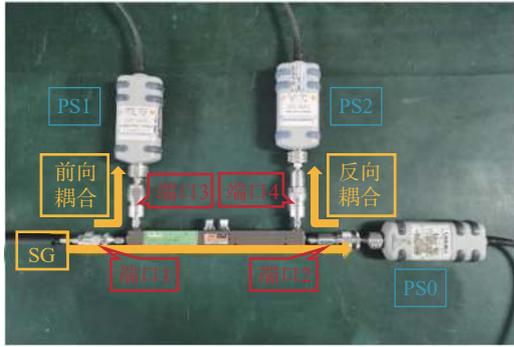


图3 实验 (a) 布置图  
Fig.3 The arrangement of experiment (a)

分别利用式(20)、式(21)以及式(1)测量馈入到PS0中的净功率,并与 $P_{net0}$ 进行比较。在利用式(20)和式(21)进行计算时,该定向耦合器被当作一个单定向耦合器使用,此时,PS2的读数不被使用,PS1的读数为式(20)和式(21)中的 $P_S$ 。

$\Delta P_1$ 、 $\Delta P_2$  以及  $\Delta P_3$  分别是利用式(20)、式(21)以及式(1)计算得到的净馈入功率相对于参考净功率的测量误差,定义如下:

$$\Delta P_1 = |P_{net(20)} - P_{net0}| \quad (22)$$

$$\Delta P_2 = |P_{net(21)} - P_{net0}| \quad (23)$$

$$\Delta P_3 = |P_{net(1)} - P_{net0}| \quad (24)$$

式中, $P_{net(20)}$ 、 $P_{net(21)}$  以及  $P_{net(1)}$  分别为利用式(20)、式(21)以及式(1)计算得到的净馈入功率。

该实验的频率范围为1~18 GHz,以1 GHz为步长,共18个频点,所有功率探头均经过校准并可溯源至国家功率基准,所有的反射系数及S参数均使用矢量网络分析仪测得。在整个实验过程当中,通过手动调节信号源的输出功率,保证每个频点上PS0所测得的 $P_{net0}$ 始终为+19.00 dBm,分辨率为0.01 dBm,并记录相关功率探头读数。此时,由于 $P_{net0}$ 的漂移和稳定性对 $\Delta P_1$ 、 $\Delta P_2$  以及  $\Delta P_3$ 造成的影响将小于0.01 dBm。实验结果如图4所示。

根据测量结果可以得到如下结论:

1)相对精度。所有频点上 $\Delta P_1$ 均小于 $\Delta P_2$ 和 $\Delta P_3$ ,最大差值出现在18 GHz,此时 $\Delta P_1$ 比 $\Delta P_2$ 和 $\Delta P_3$ 分别小1.46 dB和0.73 dB。因此,式(20)的净馈入功率测量精度要高于式(21)和式(1),证明了本文所提出的测量方法其相对测量精度要优于其他两种方法。

2)绝对精度。 $\Delta P_1$ 的最大值为0.13 dB,出现在

18 GHz,其他频点 $\Delta P_1$ 均小于0.1 dB。考虑到功率探头本身的测量精度、S参数和反射系数的测量不确定度以及某些频点负载极大的反射系数(例如18 GHz时负载反射系数达到了0.6),利用式(20)所得到的净馈入功率与参考净功率之间的偏差足够小,即本文所提出的方法具有足够高的绝对精度。

3)失配影响。由于式(21)和式(1)没有考虑失配修正,因此其净馈入功率计算结果会受到失配影响。这一点可以从图4中看出, $\Delta P_2$ 和 $\Delta P_3$ 具有随频率振荡上升的趋势,这与负载反射系数(GS0)的变化趋势大体相符,如图5所示(其中,GS1、GS2分别为PS1、PS2的反射系数,Directivity为定向耦合器方向性),说明 $\Delta P_2$ 、 $\Delta P_3$ 与负载反射系数之间存在相关性。而 $\Delta P_1$ 的变化趋势与负载反射系数之间却不存在这种相关性,且其变化相对平稳仅在小范围内波动,因此证明本文所提出的净馈入功率测量方法相较于式(21)和式(1)而言,其测量结果受负载失配影响较小。

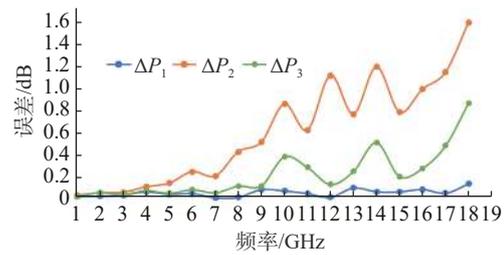


图4 不同测量方法所得到的净馈入功率的测量误差  
Fig.4 The measurement errors of the net power calculated using different methods

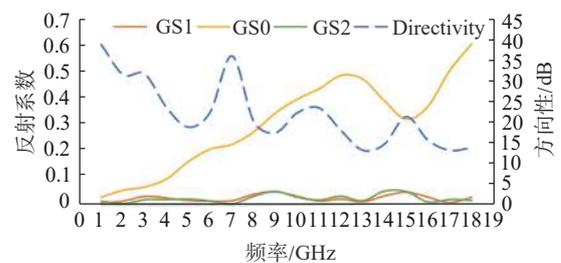


图5 各功率探头的反射系数以及双向耦合器的方向性  
Fig.5 The reflection coefficients (RCs) of the power sensors and the directivity of the coupler

综上所述,证明了本文所提出的净馈入功率测量方法的有效性。

## 2.2 实验 (b) :净馈入功率测量与电场探头校准

TEM室、GTEM室以及喇叭天线均为电场探头校准中常用的场发生装置,虽然这些装置的机理不

尽相同,但他们所产生的场强均与馈入其中的净功率相关,一个净馈入功率值对应一个标准场强值。

实验(b)系统原理图如图 6 所示,整个实验系统由信号源(SG)、功率放大器(PA)、定向耦合器(DC)、功率探头(PS)、功率计(PM)、电场探头及读出装置组成。射频(RF)信号由信号源产生并被功率放大器放大之后通过定向耦合器馈入到 GTEM 室中,之后在 GTEM 室内的参考位置处产生所需要的电场。本实验中利用一双定向耦合器充当单定向耦合器使用,并在反向耦合端连接一匹配负载,如图 7 所示。三维电场探头置于 GTEM 室内的参考位置点处,并利用激光标线仪使其  $x$ 、 $y$ 、 $z$  三轴分别与电场的三个矢量对准,但仅使用  $z$  轴读数,因为其于电场主分量平行,功率计及功率探头用于记录定向耦合器前向耦合端的输出功率,如图 8 所示。

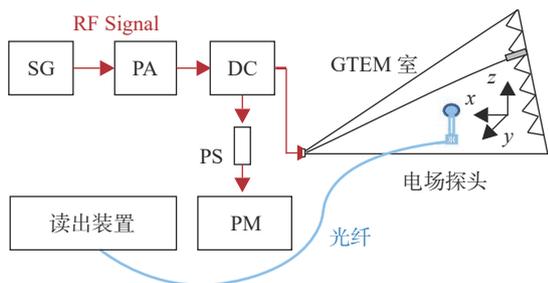


图 6 实验 (b) 系统原理图  
Fig.6 The schematic diagram of experiment (b)

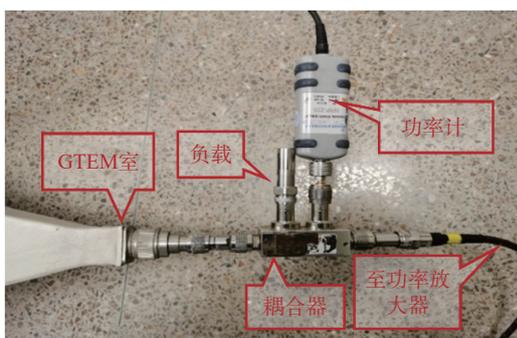


图 7 GTEM 室输入端口处的实验布置情况  
Fig.7 The experiment arrangement at the input port of the GTEM cell

开始测量实验,首先,调节信号源输出功率至一适当电平,之后记录下各频点处功率计及电场探头  $z$  轴的读数( $E_{z(20)}$ );其次,利用式(20)计算 GTEM 室的净馈入功率( $P_{net}$ );最后,再次调节信号源输出功率,使每个频点处利用式(21)计算得到的净馈入功率等于  $P_{net}$ ,并记录下电场探头  $z$  轴读数( $E_{z(21)}$ )。 $\Delta E_{rel}$ 是  $E_{z(21)}$ 与  $E_{z(20)}$ 的相对偏差。

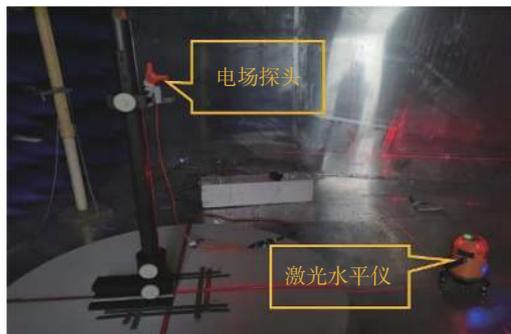


图 8 GTEM 室内部的实验布置情况  
Fig.8 The experiment arrangement in the GTEM cell

$$\Delta E_{rel} = \frac{E_{z(21)} - E_{z(20)}}{E_{z(20)}} \quad (25)$$

本实验频率范围为 300 ~ 3000 MHz,实验结果如图 9 所示。

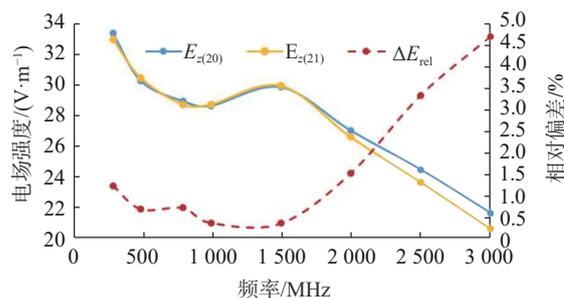


图 9 两次测量得到的电场强度及相对误差  
Fig.9 The measured E-field strength and the relative deviation

从图 8 可以看出,虽然两次测量中利用式(20)及式(21)计算得到的 GTEM 室净馈入功率是相同的,但 GTEM 室所产生的电场强度却不相同,在 3 GHz 频点处的最大相对偏差可达到 4.63%。这意味着如果使用式(21)来计算净馈入功率,由净馈入功率计算误差导致的电场强度误差可达 4.63%,这对于扩展不确定度通常只有 10% 左右的电场探头校准来说是一个相当大的误差。因此,本文所提出的净馈入功率测量方法对于电场探头校准来说是有意义的,可以减小标准电场误差及校准结果不确定度。

### 3 不确定度评定

在无线电计量领域中,净馈入功率测量误差导致的不确定度分量通常是合成不确定度中的重要分量,因此应该认真考虑并利用适当方法进行评定。从式(20)可以看出,公式中包含了许多变量且大部

分为复数,因此如果使用 GUM 方法来评定不确定度,整个过程会相当繁琐耗时<sup>[21-24]</sup>。为了简化不确定度评定过程,本文基于 NIST 开发的不确定度评定软件,使用蒙特卡罗法来进行不确定度评定<sup>[25-29]</sup>。在此过程中,各输入量和输出量被模型化为随机变量,均值和标准差分别对应于估计值及标准不确定度<sup>[30]</sup>。

本节针对实验(a)中利用式(20)计算得到的净馈入功率( $P_{net}$ )进行了不确定度评定,分别得到了绝对及相对标准不确定度  $u$  和  $u_{rel}$ 。所有  $S$  参数的数值及不确定度均来自相应设备的校准证书,功率探头的读数来自测量实验,相应不确定度来自校准证书。考虑到所有输入量的不确定度均来自校准证书( $k=2$ ),因此假设他们的分布均为正态分布。

所有频点处的不确定度评定结果如表 1 所示,其中,均值(Mean)代表对于  $P_{net}$  真值的估计值,标准差(Std)是  $u$  的估计值。虽然在 18 GHz 处相对不确定度达到了 2.25%,但考虑到此时 PS0 的反射系数已经非常高达到了 0.6,这个不确定度是可以接受的。通过比较表 1 与图 5 可以发现, $u_{rel}$  与 PS0 也就是负载的反射系数直接相关,当反射系数小于 0.3 时, $u_{rel}$  小于 1.3%,因此,对于通常所遇到的大多数负载而言,利用本文所提出的方法测量净馈入功率,其不确定度足够小。

表 1 所有频点的不确定度评定结果  
Tab.1 The uncertainty evaluation results at all the frequency points

Fre.(GHz)	Mean(W)	Std(W)	$u_{rel}$
1	0.0799	0.0010	1.20%
2	0.0802	0.0010	1.20%
3	0.0800	0.0010	1.20%
4	0.0806	0.0010	1.20%
5	0.0798	0.0010	1.22%
6	0.0803	0.0010	1.22%
7	0.0796	0.0010	1.23%
8	0.0790	0.0010	1.25%
9	0.0824	0.0011	1.30%
10	0.0771	0.0011	1.36%
11	0.0818	0.0011	1.36%
12	0.0797	0.0011	1.37%
13	0.0843	0.0012	1.38%
14	0.0806	0.0011	1.32%
15	0.0806	0.0010	1.27%
16	0.0823	0.0010	1.34%
17	0.0770	0.0013	1.85%
18	0.0772	0.0016	2.25%

## 4 结论

本文提出了一种基于单定向耦合器的净馈入功率测量方法,并开展了相关测量实验及不确定度评定。实验结果表明,本文所提出的净馈入功率测量方法测量精度高、受阻抗失配影响小,可应用于电场探头校准,能够减小标准场误差。除此之外,该方法的计算过程及不确定度评定过程简单方便,便于工程实现。综上所述,本文所提出的净馈入功率测量方法在以电场探头校准为代表的无线电计量领域具有良好的应用前景。

## 参考文献

- [1] Y. P. Hong, J. I. Park, T. W. Kang, *et al.* Ka-band Electric-Field Probe Calibration System With Rotating and Linear Motion[J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2021, 99: 1.
- [2] M. Ali, M. Perenzoni, D. Stoppa. A Methodology to Measure Input Power and Effective Area for Characterization of Direct THz Detectors[J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2016, 65(5): 1225 - 1231.
- [3] F. Musolino. Measurement of IC-Conducted Emissions by Employing a Backward-Wave Directional Coupler[J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2010, 59(7): 1983 - 1985.
- [4] 万思嘉, 钱承, 周镒, 等. 电场探头校准及系统实现 [J]. 安全与电磁兼容, 2021(6): 65 - 68.
- [5] 王炳文, 郑久寿, 陈潇然. 基于电磁兼容风险评估方法的 EMC 整改研究 [J]. 安全与电磁兼容, 2022(5): 60 - 65.
- [6] 周峰, 王景伟, 熊宇飞, 等. IEEE STD 1309-2013 电场校准标准的公式与计算讨论 [J]. 计量学报, 2017, 38(6): 763 - 764.
- [7] 邢浩, 何梓滨, 吴梦娟, 等. 电场场强校准技术的研究进展 [J]. 计量科学与技术, 2023, 67(3): 20 - 28,42.
- [8] 孙思扬, 陈晓晨, 戴巡, 等. 多探头球面近场测试系统校准方法及对准角度误差分析 [J]. 计量技术, 2018, 62(12): 78 - 81.
- [9] 梁庆凡, 孙标, 许方平, 等. 高压仪器设备计量过程中高压工频电场强度探究 [J]. 计量科学与技术, 2021, 65(9): 22 - 25,21.
- [10] 刘潇, 赵兴, 洪力, 等. 微波暗室静区性能评测及不确定度分析 [J]. 计量科学与技术, 2022, 66(4): 89 - 94.
- [11] 田梦, 李勇, 刘士暄. 无线电功率计量技术发展及国际关键对比 [J]. 计量技术, 2014, 58(6): 20 - 23.
- [12] 周鑫, 沈庆飞, 李安香, 等. 新一代无线设备最大辐射功率测试方法分析 [J]. 计量科学与技术, 2021, 65(6): 9 - 13.
- [13] X. L. M. Xie, D. Li, *et al.* A method to calculate the net power delivered in to a TEM cell using a direction coupler in a probe calibration[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 475-476: 23 - 26.
- [14] M. Kanda, R. D. Orr. A radio-frequency power delivery system: procedures for error analysis and self-calibration[Z]. US National Bureau of Standards Technical, Gaithersburg, 1985.
- [15] Zhong Chen, D. Lewis. Evaluating Uncertainties in Net Power Delivery using Dual Directional Couplers[C]. Proceedings of the International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Chicago, 2005: 782 - 786.

- [15] 中国生态环境标准化技术委员会. 固定污染源废气挥发性有机物的测定: DB 37/T 4433-2021 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2021.
- [16] 中国环境科学出版社. 固定污染源废气挥发性有机物的测定固相吸附-热脱附/气相色谱-质谱法: HJ734-2014 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2014.
- [17] 环境保护部科技标准司. 环境空气挥发性有机物的测定罐采样/气相色谱-质谱法: HJ 759-2015 [S/OL]. 北京: 中国环境科学出版社, 2015: 1-29 [2024-02-29]. <https://www.doc88.com/p-7327310809975.html>.
- [18] 国家环境保护部. 环境空气醛、酮类化合物的测定高效液相色谱法: HJ 683-2014[S]. 北京: 中国环境出版社, 2014.
- [19] National Center for Biotechnology Information. PubChem. [DB/OL]. [2024-02-29]. <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov>.
- [20] Royal Society of Chemistry. ChemSpider. [DB/OL]. [2024-02-29]. <https://www.chemspider.com>.
- [21] Chemical Abstracts Service. SciFinder. [DB/OL]. [2024-02-29]. <https://scifinder.cas.org>.
- [22] 网盛生意宝股份有限公司 (NetSun). 化工产品信息查询展示. [EB/OL]. [2024-02-29]. <http://www.chinachemnet.com>.
- [23] Chemsr. Chemsr. [DB/OL]. [2024-02-29]. <https://www.chemsr.com>.
- [24] Sigma-Aldrich. Sigma-Aldrich. [DB/OL]. [2024-02-29]. <https://www.sigmaaldrich.com>.
- [25] National Institute of Standards and Technology. NIST Chemistry WebBook. [DB/OL]. [2024-02-29]. <https://webbook.nist.gov/chemistry>.
- [26] 方向, 于连超, 任思源, 等. 标准参考数据的科学内涵及发展战略研究 [J]. 中国工程科学, 2023, 25(3): 230-238.
- [27] National Institute of Standards and Technology, USA. NIST Mass Spectral Library. [DB/OL]. [2024-02-29]. <https://www.nist.gov/srd/nist-standard-reference-database-1a>.
- [28] National Institute of Standards and Technology, USA. Analytical Chemistry Laboratory. [EB/OL]. [2024-02-29]. <https://www.nist.gov/mml/acmd/fluid-characterization-group/analytical-chemistry-laboratory>.
- [29] National Institute of Standards and Technology, USA. Resources for Traceability & Uncertainty. [EB/OL]. [2024-02-29]. <https://www.nist.gov/nvlap/resources-traceability-uncertainty>.
- [30] National Institute of Standards and Technology, USA. Accuracy. [EB/OL]. [2024-02-29]. <https://csrc.nist.gov/glossary/term/accuracy>.
- [31] National Institute of Standards and Technology, USA. Reproducibility. [EB/OL]. [2024-02-27][2024-02-29]. <https://csrc.nist.gov/glossary/term/reproducibility>.

本文编辑: 江迪

(上接第 16 页)

- [16] Jinyuan Li. Improved Net Power Delivery Using a Directional Coupler[C]. Proceedings of the International Conference on Intelligent Computing, Automation and Applications(ICAA), Nanjing, 2021: 426 – 431.
- [17] M. Takehiro. Systematic and Random Errors in the Net Power Measurement Using a Reflectometer[J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2021, 70: 1 – 10.
- [18] D. Li, Z. Song, D. Meng. Comparison of two measurement methods on net power delivery with dual directional couplers[C]. Proceedings of the IEEE Conference on Antenna Measurement and Applications (CAMA), 2017: 374 – 376.
- [19] IEEE. IEEE Standard for Calibration of Electromagnetic Field Sensors and Probes (Excluding Antennas) from 9 kHz to 40 GHz: IEEE Standard 1309 – 2013[S]. New York, 2013.
- [20] D. Gentle. Mismatch corrections for the extrapolation range[Z]. National Physical Laboratory, Teddington, 2006.
- [21] BIPM, IEC, IFCC, *et al.* Evaluation of measurement data – Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM): JCGM 100: 2008[S]. Paris, 2008.
- [22] 曹芸, 陈怀艳, 韩洁. 采用 MCM 对 GUM 法测量不确定度评定的验证方法研究 [J]. 宇航计测技术, 2012, 32(2): 75 – 78.
- [23] 刘园园, 杨健, 赵希勇, 等. GUM 法和 MCM 法评定测量不确定度对比分析 [J]. 计量学报, 2018, 39(1): 135 – 139.
- [24] 任孝平, 王健, 何运飞, 等. 基于 GUM 的比对数据处理方法和 MCM 方法比较 [J]. 计量技术, 2017, 12: 95 – 99.
- [25] The National Institute of Standards and Technology (NIST) [EB/OL]. [2024 – 03 – 09]. <https://uncertainty.nist.gov/>.
- [26] 方兴华, 宋明顺, 顾龙芳, 等. 基于自适应蒙特卡罗方法的测量不确定度评定 [J]. 计量学报, 2016, 37(4): 452 – 456.
- [27] 崔孝海, 曲璐. 蒙特卡罗方法在微波功率测量不确定度分析中的应用 [J]. 计量学报, 2008, 29(1): 77 – 79.
- [28] 陈怀艳, 曹芸, 韩洁. 基于蒙特卡罗法的测量不确定度评定 [J]. 电子计量与仪器学报, 2011, 25(4): 301 – 308.
- [29] 王伟, 宋明顺, 陈意华, 等. 蒙特卡罗方法在复杂模型测量不确定度评定中的应用 [J]. 仪器仪表学报, 2008, 29(7): 1446 – 1449.
- [30] T. Lafarge, A. Possolo. *NIST Uncertainty Machine — User's Manual*[J]. National Institute of Standards and Technology, 2013, 7: 10.

本文编辑: 霍炜炜