S参数测量中的不确定度表征

Characterizing Measurement Uncertainty in S-parameter Measurements

Tekamul Buber, Pragti Narang, Giampiero Esposito and Sathya Padmanabhan
Maury Microwave, Ontario, Calif.
Markus Zeier
Federal Institute of Metrology (METAS), Berne-Wabern, Switzerland

有人可能会问为什么工程师应该在他们的S参数测量实践中增加不确度测量，尤其是迄今为止工程师们已经习惯了忽略不确定度的问题。这个疑问很大程度上可用技术的进步来回答：随着新技术的出现以及随之作为标准的引入、产品的规格和要求越来越严苛，尤其是在工作频率越来越高的情形下。这种趋势不仅体现在系统层面上，在组件级（包括放大器，滤波器和定向耦合器）也可以明显看到。因此负责设计和生产这些组件的工程师也需要相应地提高他们开展的测量和产品表征的可信度。

想象一下如下场景：一名工程师需要设计一个放大器，要求在整个频率带宽上增益不小于规定最小值。放大器在测量后发现符合了规格。然而几个小时后，放大器被再次测量时，发现它在频带的高端不满足规格了（见图1）。为什么放大器会变得不符合规格呢？原因可能有很多种：例如测量系统的漂移、实验室中某人移动或损坏了测量设置中的一根电缆等等各种各样的可能性，甚至问题可能出在产品的设计、制造过程中或工作时有稳定性缺陷。

如果那么容易出现两次测量获得不同结果的情况，那么如何知道哪次测量是正确的呢？这种困惑是由于没有在表征过程中包含测量中的不确定度，最终导致整体上对测试结果缺乏信心。仔细的工程师会在进行测量之前，使用各种方法来验证测试设置的正确性。更加谨慎的用户会采用测试“标准器件”的确认方法。这些标准器件通常具有与实际需要测试的器件（DUT）相似的特性。采用该方法并以组织内部的指导性判据或原则来判断数据是否足够可靠。虽然这是朝正确方向迈出的一步，但问题是如何定义这些指导性判据呢？这些判据是真正客观的，还是含有内在的主观性？多接近真实值才算足够近？不确定度分析是一个功能强大的工具，它使用户既可以验证矢量网络分析仪（VNA）的校准效果，又可以在进行测量之前正确定义标准器件的度量标准。图2通过同时给出该放大器增益测量结果，以及绘出测试系统具有的不确定度，来展示了这个概念。

不确定度

无论每次多么仔细地进行测量，都会含有误差。这些误差来自仪器、测量过程或这两者兼有的缺陷。“被测量的真实值”（a_{true}）永远无法准确知道，并且真值实际上仅是一个理论上的概念。测量到的值称为“示值”（a_{ind}），真实值与测量示值之间的差异就是误差：

$$e = a_{true} - a_{ind} \quad (1)$$

由于真实值是不可知的，因此测量中的确切误差e也不可知。误差分为两种：

系统误差：在重复测量中，这部分误差保持恒定或有规律地变化，并且可以对其进行建模、测量和估计，在一定情况下可对其进行一

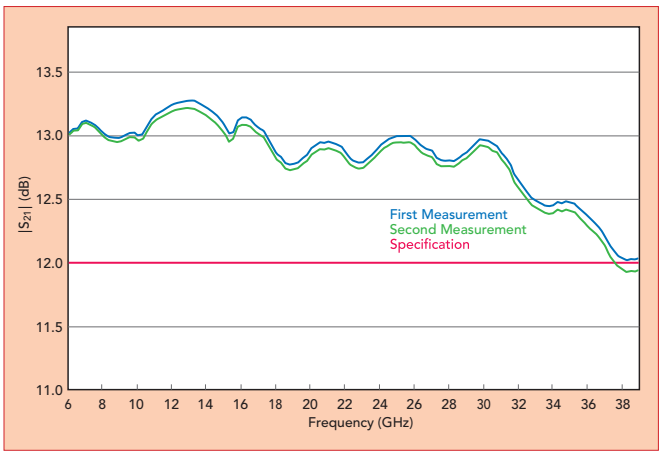


图1：放大器增益两次测量的结果：第一次结果在设计规格范围内，第二次结果则在频率高端处超出了指标可接受范围。

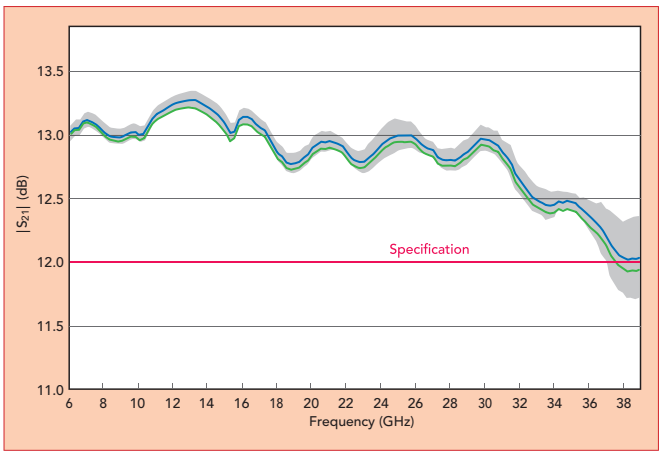
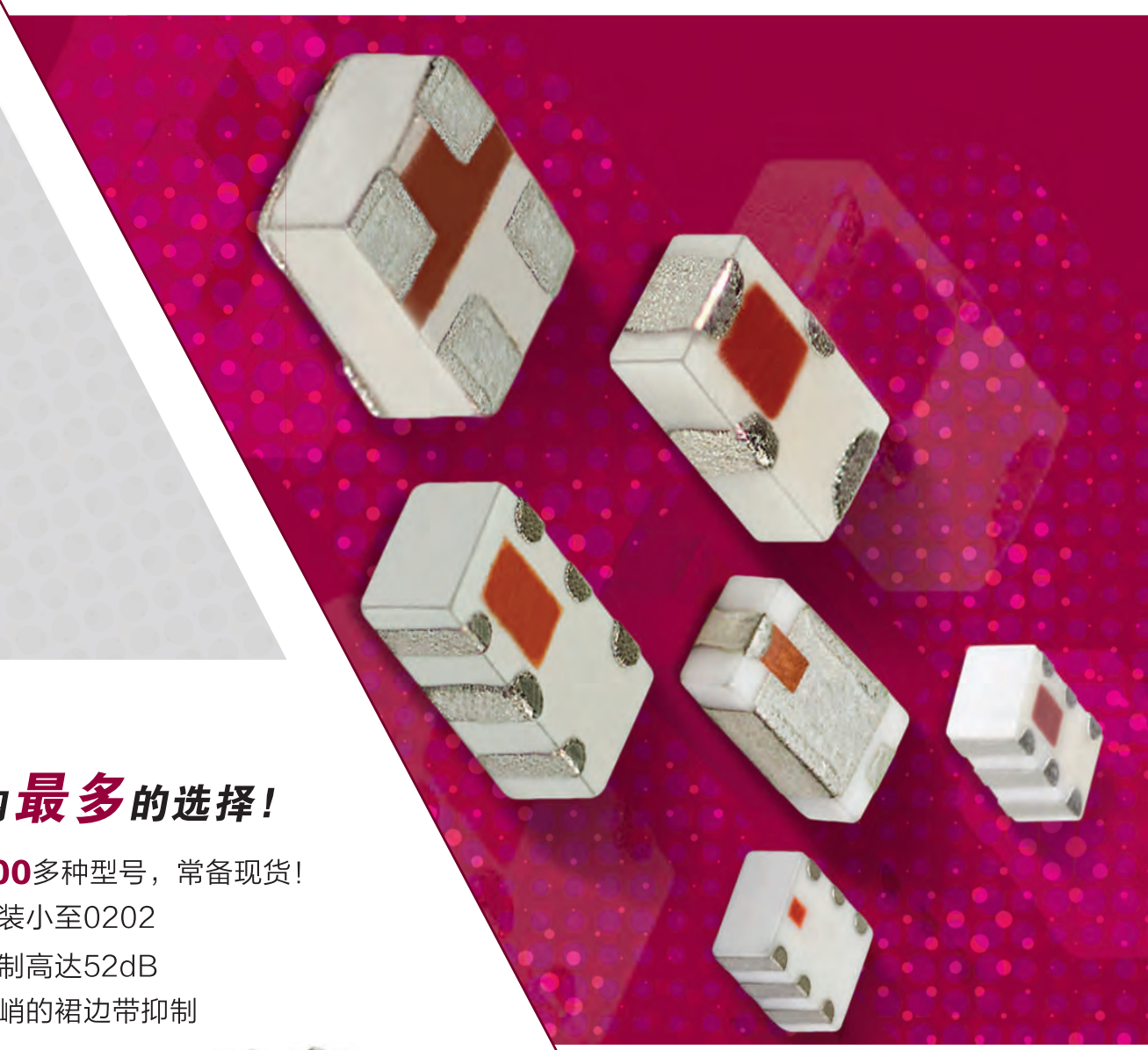


图2：使用Maury MW Insight软件计算的放大器增益测量不确定度。

LTCC
滤波器



业内最多的选择！

- ▶ 300多种型号，常备现货！
- ▶ 封装小至0202
- ▶ 抑制高达52dB
- ▶ 陡峭的裙边带抑制

0202 0402 0603 0805 1206 1210

Mini-Circuits... 我们重新定义价值所在！

CELEBRATING 50 YEARS

Mini-Circuits®
ISO 9001 ISO 14001 AS 9100 CERTIFIED
www.minicircuits.com
P.O.Box 350166，Brooklyn，NY 11235-0003
(718) 934-4500 sales@minicircuits.com

Mitron Inc.
Authorized Mini-Circuits Rep in China
伟博电讯——把最好的微波射频产品带给中国
总部地址：福建省福州市349信箱 邮编：350003
全国免费服务热线：400-887-3088 传真：0591-87870011
E-mail：sales@mitron.cn 网址：www.mitron.cn

更多产品资讯
关注伟博电讯公众号

IF/RF MICROWAVE COMPONENTS

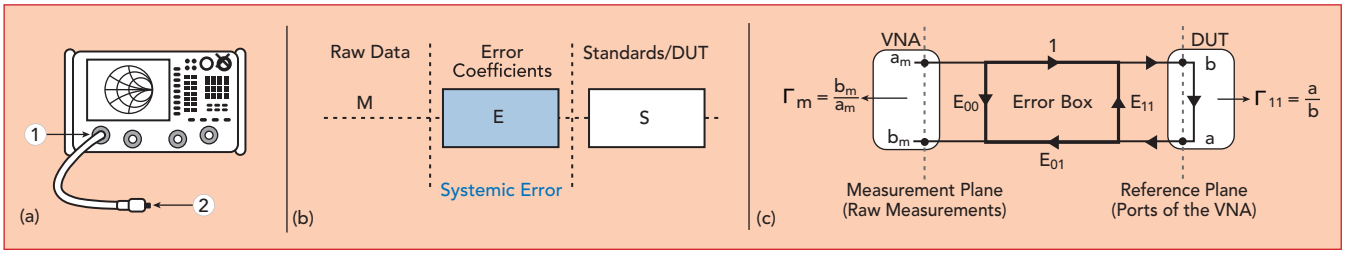


图3：单端口测量中的硬件设置（a）、系统误差模型（b）和信号流图（c）。

定程度的校正[1]。校正后剩余的系统误差则是未知的，也需要在不确定度中加以考虑。

随机误差：该部分误差在重复测量中会以不可预测的方式变化[2]。随机误差的来源有多种，例如温度变化、噪声或操作员行为的随机影响。虽然有办法减小随机误差（例如通过更好地控制测量条件），但无法对其进行校正。然而其大小还是可以通过对重复测量进行统计分析来估计的。并且可以从统计分析结果中确认不确定度。

测量通常受随机和系统误差的组合影响，因此要对不确定度恰当地进行评估，需要对不同的贡献成分进行表征。需要建立一个测量模型来将各个影响因素与测量结果联系起来[3]。提出一种足够接近现实的测量模型通常是不确定度评估中最困难的环节。通过在测量模型中传播不确定度以获得最终结果只算一项普通技术任务，即使有时这个过程相当精细繁杂。最终得到的测量结果通常表示为一个被测量的单个取值或估计值（即带有单位的具体数值）和相关的测量不确定度u。此处描述的过程是“测量不确定度的表示指南”（GUM）[4]提倡的，而GUM是评估测量不确定度的权威指南。

S参数和矢量网络分析仪校准

这些概念如何应用于S参数测量？回想一下定义，S参数是入射（伪）波（用a表示）和反射（伪）波（用b表示）的比率：

$$S_{11} = \frac{b_1}{a_1}, S_{21} = \frac{b_2}{a_1} \tag{2}$$

S参数的定义暗含了参考阻抗的定义。用于测量S参数的最常见的工具是VNA（矢量网络分析仪）。尽管存在不同的VNA架构，但用于两端口测量时最常见的版本使用三个或四个接收机[5-7]。

为了简化对该主题的理解，这里只考虑单端口VNA测量（参见图3）。如文献7所展示，可以通过归纳法获得两端口或更一般的N端口测量时的情况。图3a显示了一种典型的测试设置，其中VNA、电缆和连接器被用作测量系统来测量DUT。为了评估S参数测量中的不确定度，首先需要建立一个测量模型。用其描述输出变量、明确定义的端口（即参考平面）处的入射波和反射波之间的关系、以及VNA显示屏上的示值（即VNA接收机的原始电压读数）。这些模型应包括系统误差和随机误差，以增加结果的可信度。不正确的系统误差估计会导致测量不准确。另一方面，对随机误差的错误估计会降低结果的准确性，或者在结果不正确时却显示结果是准确的。

经典VNA误差模型

VNA测量中受到与信号损失和泄漏有关的很大的系统误差的影响，而且这些误差是不可避免的并且是现有测量技术中所固有的。根据这些系统误差可以建立示值（实测）

$$\Gamma_m = \frac{b_m}{a_m}$$

和图3c的信号流图所示的参考平面上的S参数之间的关系。

$$\Gamma_{11} = \frac{b}{a}$$

误差框由三个误差系数组成：方向性误差（E_{00}），源匹配误差（E_{11}）和反射跟踪误差（E_{01}）。通过这三个未知误差系数，可以将图3b中的图形表示的关系转换为示值和参考平面上S参数之间的双线性函数。为了估计该模型的这些未知误差系数，在单端口的情况，必须测量三个已知的校准标准件。如果是多端口情况，则需要更多的标准件。在得到误差系数的估计之后，就可以校正任何后续测量中的原始数据（即示值）。此技术通常称为VNA校准和VNA误差校正。

目前已发展出各种不同的校准方法来估计误差系数。其中一些方法要求对校准标准件进行全面表征，例如短路-开路-负载法（SOL）或短路-开路-负载-直通法（SOLT），而另一些方法则仅需要进行部分表征，例如直通-传输线-反射（TRL）、短路-开路-负载-反直通法（SOLR）和传输线-反射-匹配法（LRM）[8]。即使对校准标准件进行了表征，也无法达到完美表征，并且表征有关的误差（包括方向性、源匹配、反射跟踪误差）也会增加估计误差系数的不准确性。

工程师们已经开发出各种实验技术来估计这些残留误差（即残留方向性、残留源匹配和残留反射跟踪误差）。将端接了反射标准件的无支撑空气线（beadless airline）连接到校准端口时，可以使得残留误差以频变反射的叠加形式被观测到。在频域中这些叠加意味着反射系数会出现纹波现象（参见图4）。由于频率响应中会出现这种很有特点的图形，该方法又被称为“纹波方法”，其中纹波的幅度可用于估计与方向性和源匹配有关的残留误差和不确定度。这种方法有多种缺点，例如：无法确定误差模型中跟踪项的残留误差，而且需要使用空气介质线，并且随着频率的增加，这种方法变得不切实际[7]。

可根据经验使用残留误差来建立对测量结果的信心。而

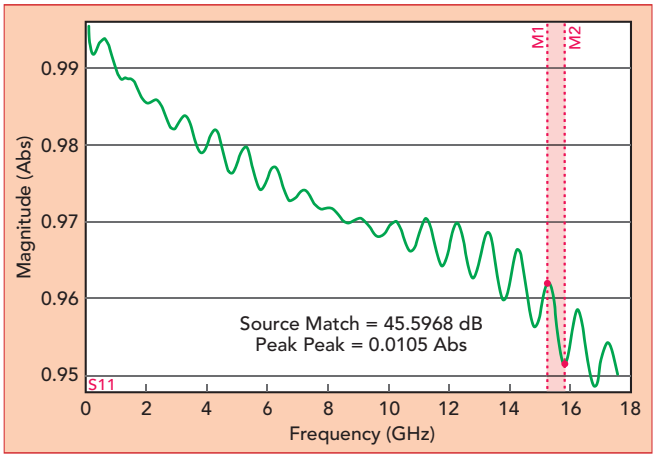
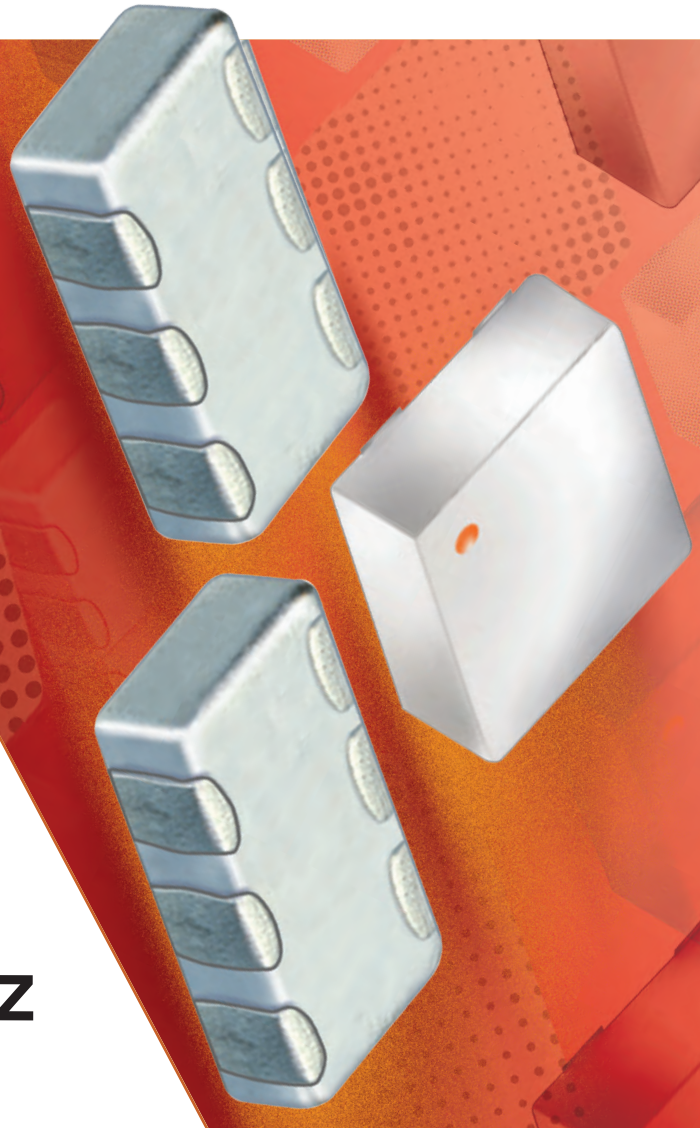


图4：使用Maury MW Insight软件进行单端口校准后的源匹配特性。

LTCC

宽带变压器&巴伦



240 MHz–18 GHz

- 封装小至0603
- 功率高达3W
- 适用于严苛环境的牢固结构
- 优越的可重复性

Mini-Circuits... 我们重新定义价值所在！

CELEBRATING 50 YEARS

Mini-Circuits®
ISO 9001 ISO 14001 AS 9100 CERTIFIED
www.minicircuits.com
P.O.Box 350166，Brooklyn，NY 11235-0003
(718) 934-4500 sales@minicircuits.com

Mitron Inc.
Authorized Mini-Circuits Rep in China
伟博电讯——把最好的微波射频产品带给中国
总部地址：福建省福州市349信箱 邮编：350003
全国免费服务热线：400-887-3088 传真：0591-87870011
E-mail：sales@mitron.cn 网址：www.mitron.cn

更多产品资讯
关注伟博电讯公众号

IF/RF MICROWAVE COMPONENTS

面临的挑战是在测量诸如具有36dB回波损耗的DUT时，要理解45dB的残余指向性误差代表什么含义。但使用波纹法进行估算得到的误差系数的不确定度并不太可靠，并且也不足以在测量结果中获得充分的置信度。因此经典的VNA误差模型是不完备的，也无法在执行VNA校准和VNA误差修正的同时实现不确定度评估。

在经典VNA误差模型中考虑不确定度

本节说明如何通过添加影响测量的其他因素来将经典的VNA误差模型扩展为完整的测量模型。使用这样的一个完整模型，就可以用直接且概念清晰的方法来评估不确定度。从校准参考平面到接收机读数参考面之间的测量装置包含多个误差源和影响总不确定度的因素。经典的VNA误差模型把这些因素包括进去，从而可以扩展成为完整的测量模型。典型的组成因素包括VNA（例如线性度、噪声和漂移）、电缆、连接器和校准件。欧洲国家计量协会（EURAMET）推荐使用图5所示的模型，其中传统误差系数由E方块表示，其他影响因子由R、D和C方块表示[7,9]。图中的完整模型仅包含组成模块，而使用信号流图可对其进行进一步完善的描述。在不赘述这些模型的细节的情况下，下文将对主要误差及其相关的信号流图进行讨论。

电缆和连接头

在参考平面和接收机测量平面之间使用电缆连接，因此电缆也需要包含在校准中。它们会受到环境变化以及对电缆的移动和弯折的影响。在校准或DUT测量期间移动或弯曲了电缆的话，误差系数通常会发生变化。如图6a所示的电缆模型中使用了两个参数：电缆传输系数（CA_T）和电缆反射系数（CA_R）。虽然电缆供应商通常在电缆组件的数据表中给出了这些值，但还是应针对电缆在校准和测量过程中的典型弯曲或移动范围来进行表征[7]。

同理，用于连接和断开校准标准件和DUT的连接头也会影响参考平面，具体取决于接头中的针和指的设计与制造的可重复性。每次连接、断开和重新连接时，连接头的S参数响应都不同，对此可用一个连接器重复性（CO_R）来描述。

VNA

VNA中的接收机在高输入功率水平下往往会偏离线性行为。非线性本质上是一个系统误差，因此可以使用适当的非线性模型进行校正。由于每个接收机的非线性行为都可能不同，并且对每个接收机分别进行建模是不切实际的。因此这里采用线性模型（在图6b中表示为L）来近似表示非线性。

噪声是一个随机误差，会导致VNA读数中包含不可预测的波动。噪声分为本底噪声（N_L）和迹线噪声（N_H）两种。在没有任何源信号输入的情况下观察到的是本底噪声，而迹线噪声则随着所施加的源信号电平一同增加。

由于温度和其他环境因素的影响，会导致整个测量系统的性能出现随时间的漂移变化。如图6b所示，可用一个简单的模型将漂移值（D_{00}、D_{11}、D_{01}）与每个误差项关联起来。

校准标准件

校准标准件也需要表征，并将其不确定度包括在如图5所示的方框S中。根据所需的精度水平的高低不同，可以分别从制造商、校准实验室或国家计量机构等渠道获得，而这些表征结果都溯源至SI单位[10]。实践已证明如果在表征中考虑接头的影响，可以使得同轴校准标准件的标准结果更准确、更一致[11]。在进行VNA校准以估计误差系数时，这些不确定性会与其他对误差系数的影响一起在模型中传播。

表1 图7不确定度贡献表

来源	幅度 (x 10^{-3})	百分比 (%)
VNA本底噪声	1.145	0.104
VNA迹线噪声	4.520	1.615
VNA线性度	7.163	4.056
VNA漂移跟踪	0.5132	0.021
VNA漂移对称性	0.5444	0.023
电缆传输	33.26	87.47
电缆反射	8.630	5.887
接头反射	3.227	0.823

一旦对所有误差和影响的来源完成了建模和估计，就可以进行VNA校准和误差修正。不确定性的贡献会通过整个测量模型传播到测量结果中。如果满足以下条件，则足以认为测量结果具有高可信度：

- 所有重大误差和影响来源均包含在误差模型中（请参阅前面描述的误差模型）。
- 实际可靠地估算了误差来源，即根据实际测量条件对这些误差进行表征；尤其是在某些情况下，供应商提供的规格参数可能不够用。
- 准确表征了校准标准件，并得到实际可靠的不确定度。

大多数测量设置通常都满足第一个条件。第二个主要取决于测试操作人员对不确定性的估计，而第三个取决于标准件表征结果的来源。

使用这种方法将使工程师能够选择为不确定度留的裕量，以及判断对总不确定度的主要贡献因素。这是一个功能强大的工具，因为如果遇到了不确定度很大的情况，它将指示在何处提高系统精度。放大器测量的例子（参见图7和表1）可以很好地说明这一点。其中电缆的稳定性和连接器的可重复性占总不确定度的90%以上。

验证和确认工具

有多种方法和技术可用于验证校准的好坏。一些方法使用T型校验件（T-checker）或Beatty标准，另一些则使用预先表征好的验证标准件。校准的质量可能存在缺陷，因为有可能遇到各种预料之外的误差来源，例如校准时把校准件搞混、用了错误的标准件、使用了损坏的标准件和电缆、连接头没有上紧、或由于环境的变化而引起的系统突然出现的噪声。由于表征通常不会考虑

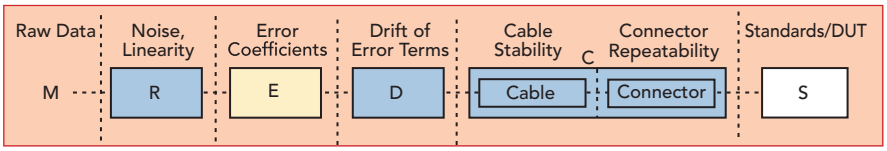


图5：VNA测量模型。

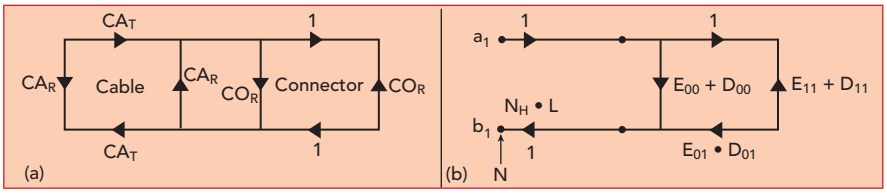


图6：电缆和接头的模型（a）以及VNA噪声、线性度和漂移（b）的模型。

DARE!!

EMC 系统解决方案专家

连续波功率计

无线宽带信号功率计

脉冲功率计

RadiPower® 6/18 GHz RF功率计

频率最低扩展至4kHz

连续波功率计

特点：

- 高速采样1M/s
- 高动态范围＞65dB
- 高测量精度低至0.15dB
- USB接口控制

RadiPower® 探头	RPR2006C(#010)		RPR2018C
Detector type	Log detector		
Measurement function	RMS CW power, Peak power (Max.hold)		
Frequency range	4 kHz ~ 9 kHz	9 kHz ~ 6 GHz	80 MHz ~ 18 GHz
Power measuring range	-40 dBm ~ +10 dBm	-55 dBm up ~ +10 dBm (Usable ~ –60 dBm)	-45 dBm up ~ +10 dBm (Usable ~ –50 dBm)

无线宽带信号功率计

特点：

- 高速采样5M/s
- 测试图形可存储
- 可测试4G/5G、WIFI 蓝牙宽带信号
- USB接口控制

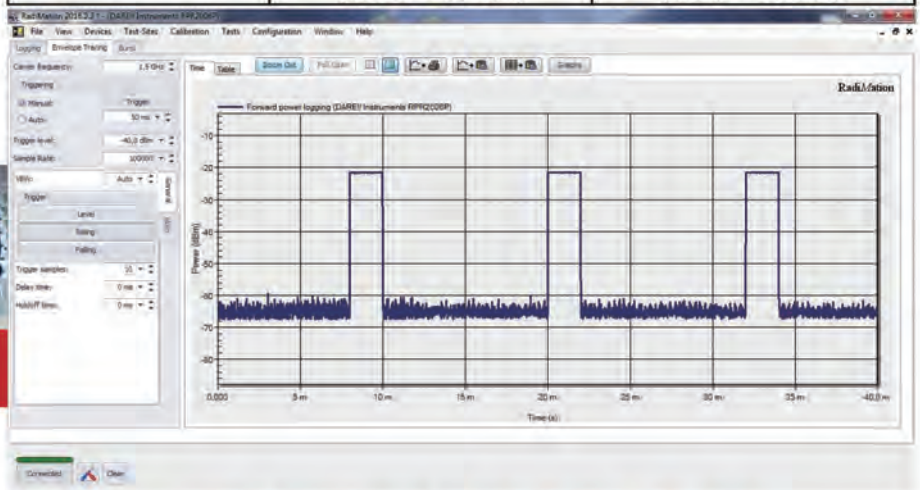
RadiPower® 探头	RPR3006W
Detector type	RMS Log detector
Measurement function	RMS CW power, peak (Max.hold) and Burst mode
Frequency range	10MHz ~ 6 GHz
Power measuring range	-50 dBm ~ +10 dBm

脉冲功率计

特点：

- 高速采样1M/s
- 最小测量脉宽2us
- 测试图形可存储
- USB接口控制

RadiPower® 探头	RPR2006P	RPR2018P
Detector type	Log detector	
Measurement function	RMS CW power, Peak power (Max.hold) and Envelop Tracing mode	
Frequency range	9 kHz ~ 6 GHz	80 MHz ~ 18 GHz
Power measuring range	-55 dBm ~ +10 dBm (Usable ~ –60 dBm)	-45 dBm ~ +10 dBm (Usable ~ –50 dBm)



www.dare.eu

Mitron 伟博电讯 把最好的微波射频产品带给中国

销售热线：400-887-3088 传真：0591－87870011 E－mail：sales@mitron.cn 网站：www.mitron.cn

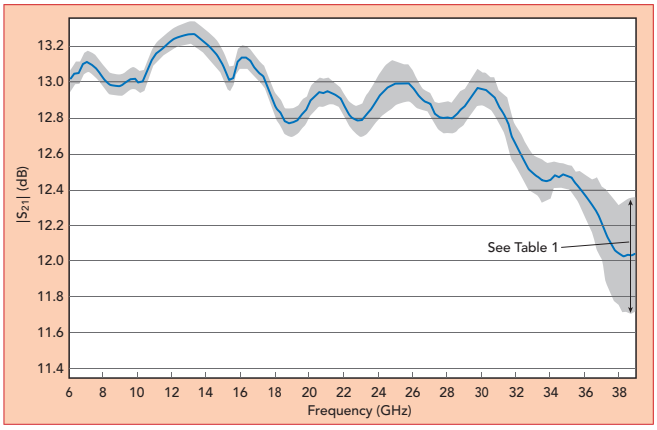


图7：使用Maury MW Insight软件计算的放大器增益测量的总不确定度。

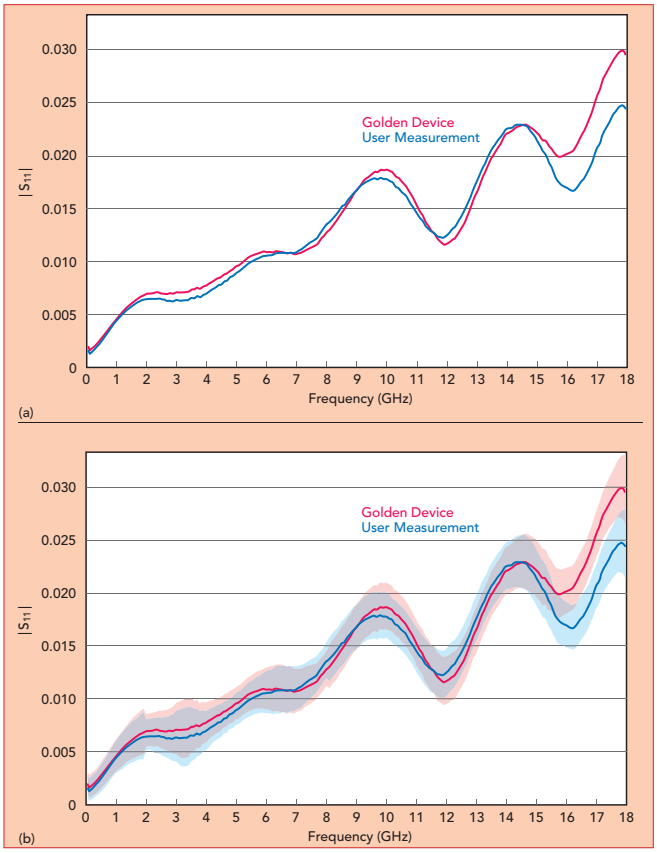


图8：表征器件和用户测量结果的比较（a）；相同数据的叠加显示了测量不确定度（b）。

这些影响颇大的不确定性因素，因此不确定度预算中不会计入这些误差，因此会降低校准质量从而降低测量精度。

本节主要介绍验证器件，因为使用它们后可以对校准精度做验证并估算可达到的精度水平。根据国际计量词汇表（VIM）定义[12]，所谓验证是指提供了客观证据来表明校准符合了指定要求。然而这些要求是可以较为随意地指定的，因此比验证更重要的是确认[13]。所谓确认是指验证这些指定的要求足以用来测量想测量的器件。

当前大多数的验证器件都没有表征好的不确定度，因而用户很难为确认环节指定适当的要求。在大多数情况下，用户只能将参考特性与实际测量值进行比较，并估计两者的接近程度。这是种相当主观的方法，如判断图8a显示的幅度上的差异。问题是这样判别一下是否就足够了。如果结果中包括了不确定度，则用户可以按以下方式更系统地和定量地进行评估：

- 选择一个以前表征过且具有不确定度的验证标准件，并且该标准件是这一类测量中具有代表性的。例如单端口的低反射测量，可以选择一个不同于校准标准件的固定负载。
- 通过以下步骤确认当前搭建的测试设置的不确定性是否过大：1）将该测试设置所得的不确定度与验证器件制造商提供的不确定度进行比较；2）将该测试设置的置信度95%的不确定度与DUT的设计容限进行比较。按照95%置信区间扩大的不确定度应始终小于设计公差；3）如果不确定性不满足上述两个条件，则需要重新评估用于校准的VNA、电缆、连接头和校准套件。
- 最终可用归一化误差完成确认[7]，该误差的标量版本由以下方式定义：

$$e = \frac{1}{1.96}\frac{|\hat{d}|}{u(\hat{d})} \qquad (3)$$

其中d是测量器件和验证器件之间差异的估计值，而u（d）是差异值的标准不确定度估计。系数1.96代表95%的覆盖条件，而这在合格评定中是很常见的。图8b显示了和图8a相同的放大器测量结果的不确定度。两个不确定度重叠不足的区域会导致e>1，这表示验证失败。

结论

随着技术的发展，各种要求变得越来越具有挑战性，因此采用能够提高测量置信度、能确保准确可靠表征和确保产品性能的测量过程变得至关重要。表征和量化测量不确定度就是达到上述目标的一种方法。不确定度分析有助于在测量DUT之前确定性地验证VNA校准的质量。不确定度有助于理解测量系统中的各个组件如何影响DUT测量的总不确定度。在测试设置中识别、量化和减少不确定度的主要来源，将提高测量的整体准确性。参照图1所示的最初的放大器测试场景，量化测量中的不确定度可以让测试人员充分相信测量结果反映了DUT的真实性能，并且该设计不会在测试中出现时而通过、时而失败的情形。■

参考文献

1. Clause 2.17, "VIM: International Vocabulary of Metrology, Third Edition," JCGM 200:2012, www.bipm.org/en/publications/guides/vim.html.
2. Clause 2.19, "VIM: International Vocabulary of Metrology, Third Edition," JCGM 200:2012, www.bipm.org/en/publications/guides/vim.html.
3. Clause 2.48, "VIM: International Vocabulary of Metrology, Third Edition," JCGM 200:2012, www.bipm.org/en/publications/guides/vim.html.
4. Evaluation of Measurement Data, "Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement," JCGM 100:2008, www.bipm.org/en/publications/guides/gum.html.
5. M. Hiebel, "Fundamentals of Vector Network Analysis," Rohde & Schwarz, 2007.
6. J. P. Dunsmore, "Handbook of Microwave Component Measurements," 2014.
7. M. Zeier, D. Allal and R. Judaschke, "Guidelines on the Evaluation of Vector Network Analyzers (VNA), EURAMET Calibration Guide, No. 12, Version 3, 2018, www.euramet.org/publications-media-centre/calibration-guidelines/.
8. "Improving Calibration Accuracy and Speed with Characterized Calibration Standards," Maury Microwave App Note 5C-090.
9. M. Zeier, J. Hoffmann, J. Ruefenacht and M. Wollensack, "Contemporary Evaluation of Measurement Uncertainties in Vector Network Analysis," Cal Lab Magazine, October–December 2018, pp. 22–31, www.callabmag.com/contemporary-evaluation-of-measurement-uncertainties-in-vector-network-analysis/.
10. Clause 2.41, "VIM: International Vocabulary of Metrology, Third Edition," JCGM 200:2012, www.bipm.org/en/publications/guides/vim.html.
11. M. Zeier, J. Hoffmann, P. Hürlimann, J. Rüfenacht, D. Stalder and M. Wollensack, "Establishing Traceability for the Measurement of Scattering Parameters in Coaxial Line Systems," Metrologia 55, January 2018, S23–S36.
12. Clause 2.44, "VIM: International Vocabulary of Metrology, Third Edition," JCGM 200:2012, www.bipm.org/en/publications/guides/vim.html.
13. Clause 2.45, "VIM: International Vocabulary of Metrology, Third Edition," JCGM 200:2012, www.bipm.org/en/publications/guides/vim.html.