

RF & Microwave e-Academy Program

Powerful tools that keep you on top of your game

RFMW 101: 传输线原理和功率测量



Agilent Technologies

Technical data is subject to change. Copyright©2004 Agilent Technologies
Printed on Jan, 2004

5988-8493CHA

欢迎来到教学模块**RFMW 101**传输线原理和功率测量。

我们强烈为射频和微波领域的新兵推荐这一模块。其它模块也会涉及这里介绍的原理。

我们现在开始讲授。

议程

如果您能回答这些问题：

- 为什么要测量功率？
- 好的传感器有哪些特点？
- 有办法测量峰值功率吗？
- 什么是调制信号？
- 我能在多大程度上影响不确定度？

那么您已有良好的基础！

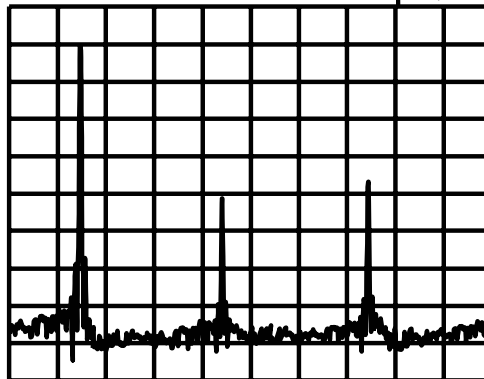
在这一自学模块中，我们将说明为什么要用测量功率代替电压和电流测量。然后将详细介绍功率测量和功率测量仪器。

正确信号电平的重要性

过低：信号埋入在噪声中



过高：产生非线性失真



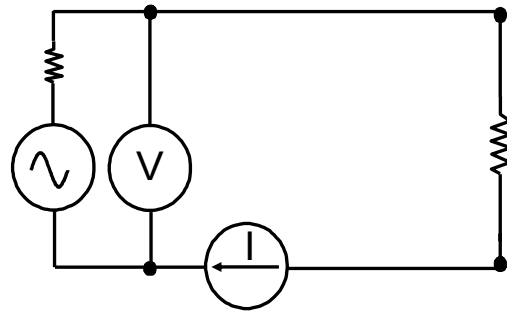
我们为什么要测量信号电平？系统的输出信号电平往往是射频和微波设备设计和性能的关键要素。

信号电平的测量对每一个系统，从系统总体性能到功能器件都至关重要。对系统性能的大量重要测量要求测量仪器和技术是精确的、可重复的、可溯源的和方便的。

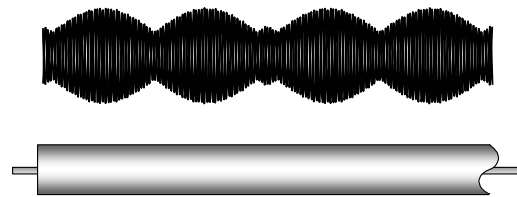
系统信号链中的每一个元件都必须接收到前面元件的正确信号，并在后面的元件上施加适宜的信号电平。如果输出信号电平太低，信号就会淹没在噪声中。如果信号电平过高，性能就会出现非线性和失真，甚至更坏的结果！

为什么要测量功率？

低频时很容易测量电压（或电流）



但在高频时，沿传输线有不同的电压！



在直流和低频时，电压测量是简单和直接的。如果需要功率，也很容易通过计算获得。

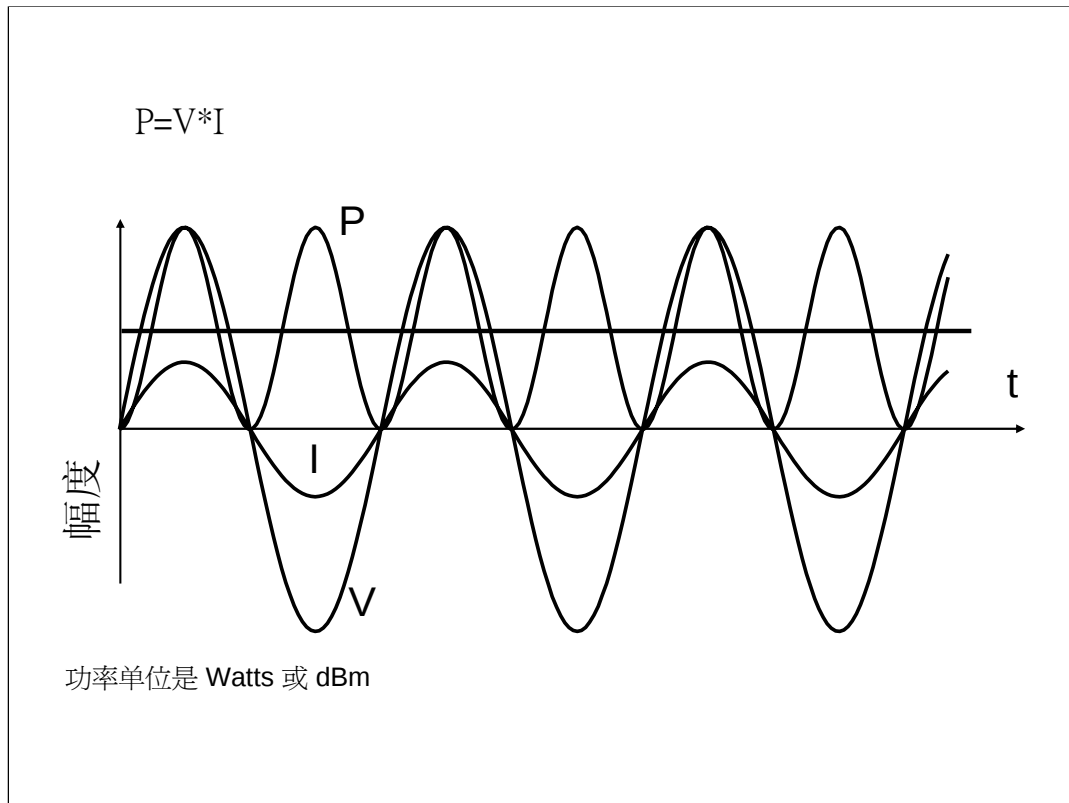
我们从欧姆定律知道 $V=IR$ ，我们也知道 $P=VI$ 。通过代换 V 或 I ，就有两种可能得到功率的方法， $P=I^2R$ 或 $P=V^2/R$ ，取决于知道哪一个变量。

$$P = IV = \frac{V^2}{R} = I^2 R$$

但当频率接近1GHz时，大多数应用都采用直接功率测量，因为电压和电流测量已变得不现实。

高频路径被称为传输线。我们如何定义传输线？广义来说是传输路径的长度变得可与传输信号的波长相比。这些导线就开始展现行波现象。

我们测量功率的一个理由是电压和电流可能随无损传输线的位置改变，但功率仍保持常数值。另一个降低可用性的例子是在波导传输配置中很难确定电压和电流。由于这些理由，在射频和微波频率，作为基本量的功率更容易测量，更容易了解，也更有用。



首先让我们确定我们理解所谈论的功率。一般电路理论认为对于任意负载，功率是电压、电流和功率因素的积（功率因素定义为电压和电流相角的余弦）。对于纯电阻性负载，功率因素为**1**，瞬时功率就是电压和电流的积。对于AC信号，我们可看到功率和时间相关。电压和电流的积是带DC项（平均值）的正弦波，频率为该AC信号的2倍。作为最常使用的“功率”一般是指平均功率。为找到该平均值，必须积分功率曲线，确定曲线下面的面积，然后除以该面积的时间长度。注意：该时间长度应是精确的AC周期数，但随着周期数越来越高。无论您测量的周期数是否精确，造成的只是难以察觉的差别。

通常功率定义为在所包含最低频率的多个周期上，单位时间所传输能量的平均值。

周期正弦电流（电压）的rms值定义为在电阻R上提供相同平均功率的DC电流（电压）。

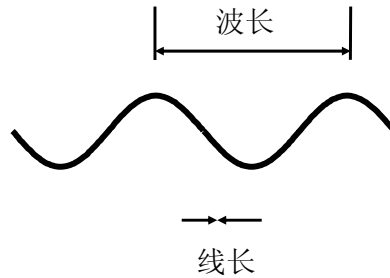
$$V_p = \sqrt{2}V_{rms} \quad I_p = \sqrt{2}I_{rms}$$

传输线基础

波长要比导线长得多。

电流能在导线上容易地进行高效率的功率传输

电压和电流的幅度和相位与在导线上的位置无关。



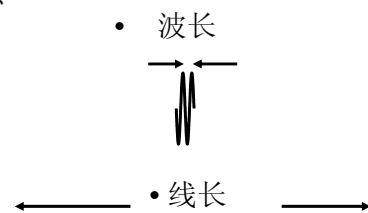
现在让我们更详细地了解传输线。

在低频世界（通常 $<100\text{MHz}$ ）中，流过导线的信号波长远远长于导线的本身长度。无论我们进行的是电压还是电流测量。

传输线基础

高频 (> 100 MHz)

- 波长小于传输介质的长度。
- 负载和源匹配至导线的特性阻抗 (Z_0)，以得到最大的功率传输。
- 在不良匹配时，电压和相位与导线位置有关。

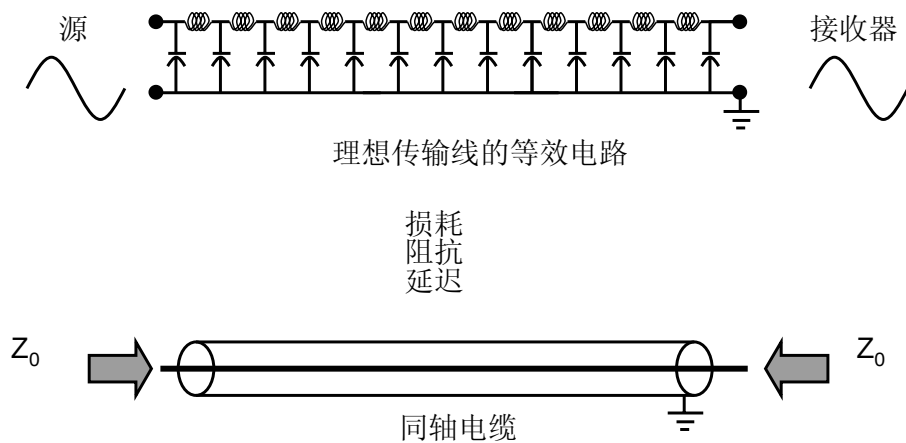


较高频率时情况发生了变化。通过传输线传播的信号波长变得可以与传播距离相比。此时会发生两种情况。一是称为特性阻抗 Z_0 的参数变得极为重要，二是被测电压或电流取决于我们进行测量的导线位置。

但功率仍是常数。这就是为什么在高频世界中更多测量的是功率，而不是电压或电流。

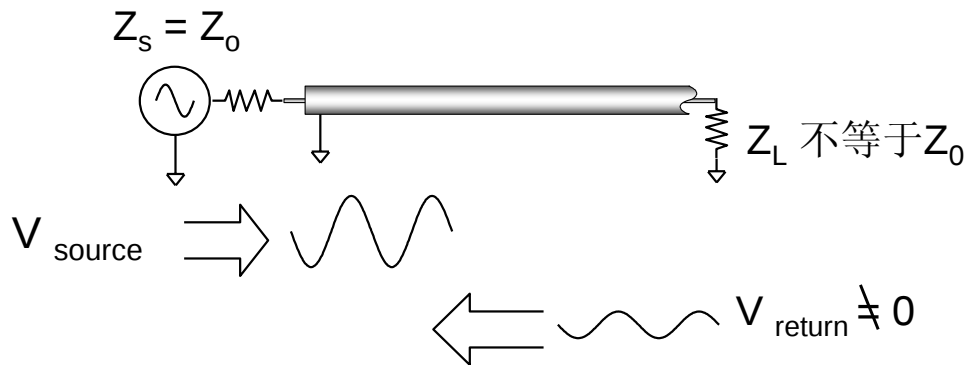
传输线

传输线和特性阻抗



特性阻抗定义为整个导线或电路的平均行为。各后续部分看到的是相同的阻抗。沿导线的一致阻抗对于实现最佳功率传输极为重要。让我们看看在理想条件下发生了什么。

传输线终端

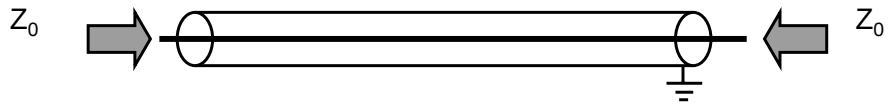


阻抗匹配不完善，信号反射回源。

让我们拿一个玻璃透镜作比拟。传输线就像是一块玻璃透镜。如果透镜是一个完美的传送器，任何光线都将能穿过透镜从另一端输出。如果它是一面完美的镜子，那么所有入射的光线都会从镜子上返回。事实上透镜不可能绝对完美。照射在它上面的大部份光线将会穿过，但有少部分会从它光洁的表面返回。

传输线就类似这种情况。它并非完美的器件（即并非完美的端接），因此部分入射信号将返回它的源。如果导线终端为开路或短路，那么所有信号都将返回。如果是完美的端接，那么就没有信号返回（从源看起来就像是无限长的导线）。所以如果 Z_L 是在开路和短路之间的 Z_0 ，部分功率将通过，部分功率将反射回来。因此设计窍门就是要使 Z_L 尽可能接近 Z_0 。

特性阻抗



有共同值：50 Ω (Ohms) 和 75 Ω

描述电压和电流行波间的关系

Z_0 的典型值为50 Ω 或75 Ω 。为什么取这些值？因为能兼顾同轴电缆的功率管理和最低衰减点。大多数射频和微波设备及系统趋向于使用50 Ω 。广播和有线电视则使用75 Ω 。

我们在这里概要介绍了为什么要测量功率，以及 Z_0 对于最佳功率传输的重要性。我们将在下面几张幻灯片中看到功率测量中负载与 Z_0 失配对测量不确定度的贡献。现在开始详细说明功率测量。

功率单位

- 可测量绝对功率或相对功率。
- 功率的 SI 单位是 Watt。
- 分贝是另一种常用单位

$$N = 10 \text{ Log } (P2/P1) \text{ dB}$$

- 对于 dBm, 我们使用 $P1 = 1 \text{ mW}$

我们通常在SI单位制中规定功率单位为W。这是一种绝对测量。有时以比率说明功率更为方便。特别是涉及比较2个功率级的增益或损耗时。这是用分贝（dB）表示的相对功率概念。

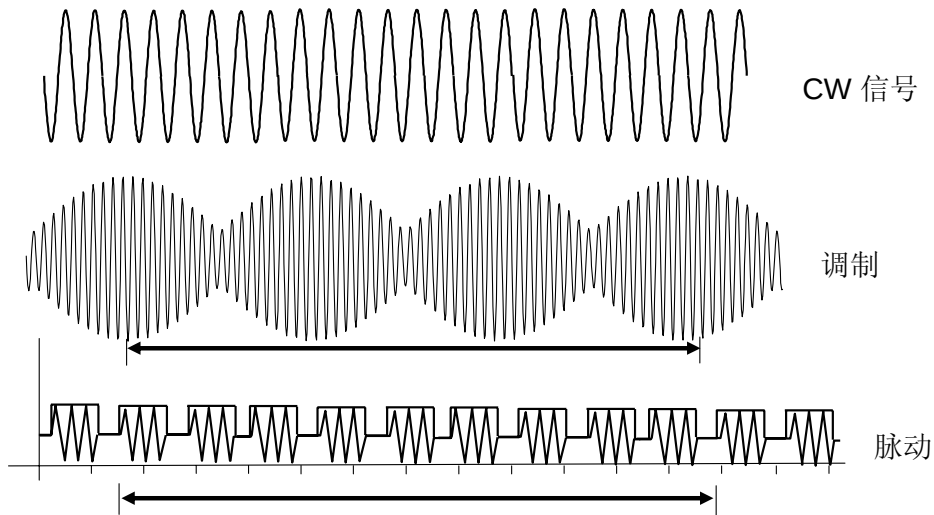
用分贝单位表示增益或损耗有二个优点 —— 它是容易表示大数（或小数）的计数法。此外，几级级联网的总效应可以用相加dB单位的简单方法代替线性值相乘。

一个更为方便的单位是dBm —— 它是相对于1mW，以dB为单位的功率级。因此0dBm是 1mW。一个简单导则是每3dBm功率加倍，每 -3dBm功率减半。每10dBm为10倍，每 -10dBm为1/10。

例如+36dBm是多少？让我们由0dBm开始，我们已经知道它是1mW。+30dBm将是 $1 \text{ mW} * 10 * 10 * 10$ ，即1W。+6 dBm是 $1 \text{ W} * 2 * 2$ ，因此最后结果是 4W。

-23dBm是多少？使用同样方法从1mW开始，-20dBm是 $10 \mu \text{ W}$ 。-3dBm 将减半，因此最后结果是 $5 \mu \text{ W}$ 。

平均功率



现在，让我们详细讨论功率测量。

对于一个AM信号，要在许多调制周期上作平均，对于脉冲调制信号，则要在若干脉动重复上平均信号。在所有功率测量中，平均功率是最常进行的测量，因为有使用方便、具有高精度和可溯源指标的测量设备。

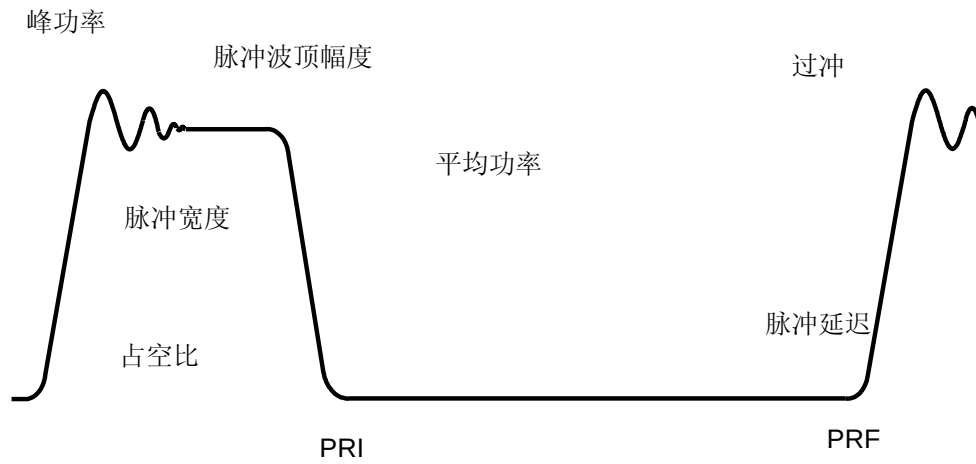
如果知道特定的波形信息，有时能从平均功率测量计算其它波形信息。例如，如果知道矩形脉冲信号的占空比，就可从平均功率测量按下列公式确定峰功率。

$$P_{peak} = P_{avg} / \text{占空比}$$

应注意这里的峰功率仅适用于没有过冲的真矩形脉冲。

$$P_{peak} = \frac{P_{avg}}{DutyCycle}$$

普通波形



当谈论功率时使用着许多不同的术语，这张幻灯片中示出了其中一些术语。在我们的讲述中集中关注3种不同类型的功率测量，平均功率、峰功率和时间选通功率测量。平均功率是在几个周期上得到的平均功率，在谈到“功率”时一般即指平均功率。峰功率是最大瞬时功率，为今天许多复杂无线调制系统所需要。最后，时间选通功率测量允许在时域进行峰功率和平均功率这两项测量，TDMA系统，如GSM 特别对其关注。

我应使用哪些仪器？



- 频谱分析仪
- 网络分析仪
- 矢量信号分析仪
- 功率计

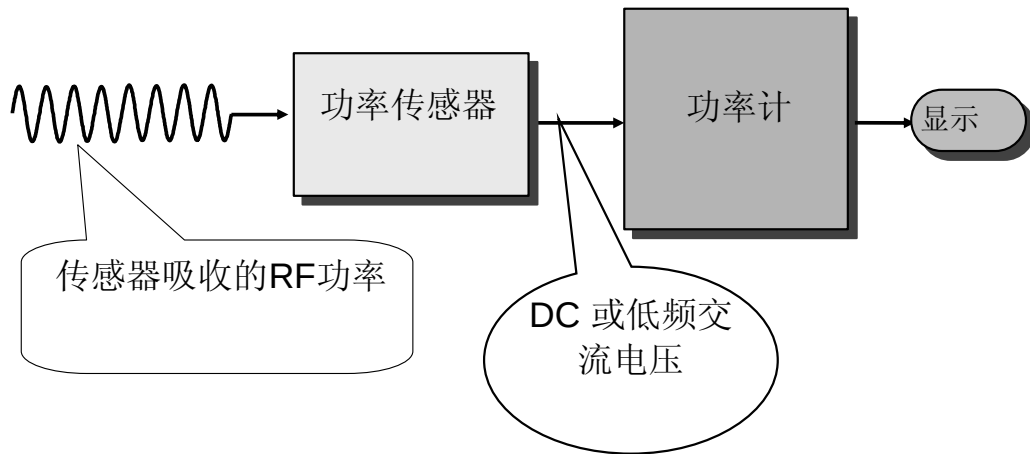
虽然有多种能够测量功率的仪器，但最精确的仪器是功率计和传感器。传感器为RF功率-电压传感器。功率计显示检测电压，它表示以对数（dBm）或线性（W）为单位的功率值。功率计的典型精度为百分之几dB，而其它仪器（如频谱分析仪、网络分析仪）的功率测量精度只有十分之几dB，甚至更低。

仪器间的主要区别之一是选频测量。选频测量试图确定规定带宽内的功率。典型功率计不是选频测量，它测量传感器整个频率范围的平均功率，包括载波功率和可能产生的任何谐波。频谱分析仪提供选频测量，因为它是在特定分辨率带宽中测量。

缺乏选频是功率计不能测量很低功率的主要原因，大约只能到-70dBm，而频谱分析仪这类仪器如果使用很窄的分辨率带宽，就能测量远低于它的功率。

在本教学模块的其它部分我们将集中讨论功率计和传感器。

使用功率计测量

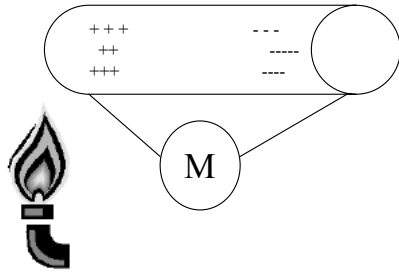


现在，让我们了解在平均功率测量中使用的各种类型传感器和功率计。

功率传感器的基本概念是把高功率转换为功率计能够测量，并相关于特定**RF**功率级的直流或低频信号。因此它是一种传感器件。

有三种主要的传感器类型，即热敏电阻、热偶和二极管探测器。它们各有所长和所短。我们将简要介绍每种传感器的原理，然后说明其优缺点。

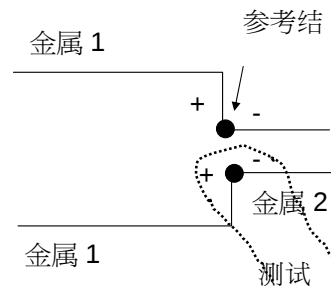
热偶



坚固

适中的动态范围

高精度

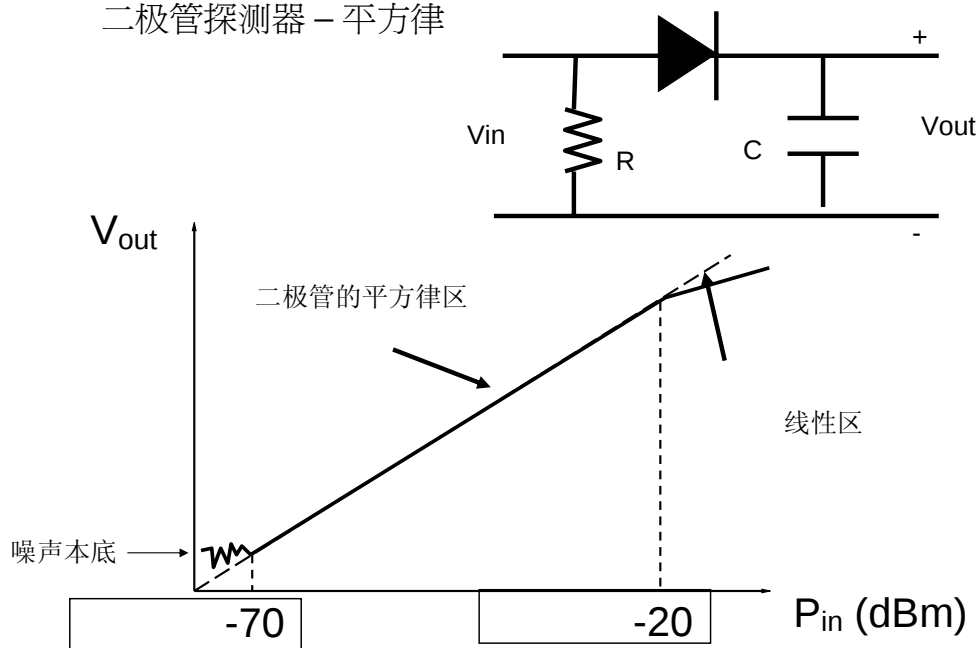


这些器件的电压或电阻是温度的函数，因此能进行很好的平均功率测量。注入这些器件的功率被吸收，并造成温度上升，其电压或电阻的改变正比于注入功率。热偶结电压的变化是温度的函数。实际热偶功率传感器有二个结，一个保持于室温，另一个暴露于被测入射RF功率。

由于RF功率改变了探测结的温度，在两个结之间会产生一个净电压差 ΔV 。选择适当的结材料，该电压就能是耗散RF功率的线性函数。为获得高精度需要两个已知校准点。把固定直流偏移校正到零耗散功率，斜率即为热偶响应。

热偶功率传感器在几个量程中提供-30至+45dBm的高精度功率测量。以及最低的反系数。

二极管探测器 – 平方律



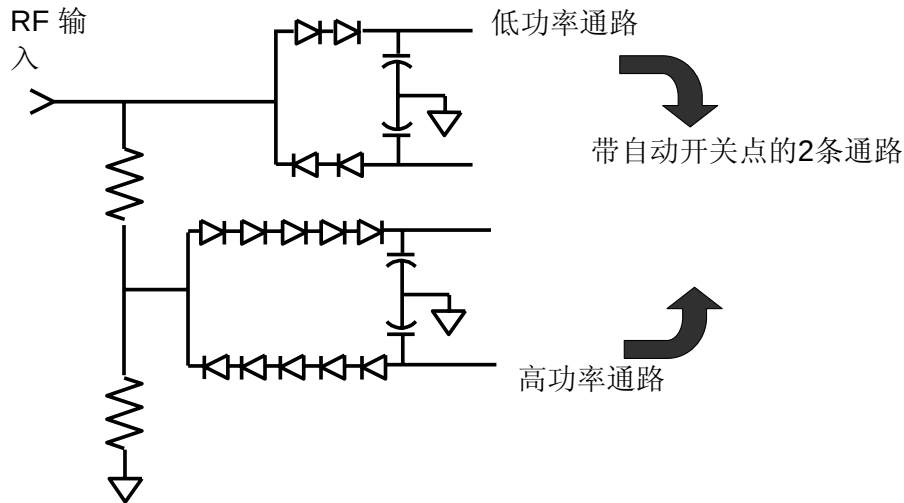
与热敏电阻和热偶不同，二极管并不测量信号的热成分，而代之以整流信号。匹配电阻器（约 $50\ \Omega$ ）用于RF信号的端接。二极管把RF电压转换至直流电压，旁路电容器作为一个低通滤波器被用于去除任何通过二极管的RF信号。

二极管传感器的一项主要属性是其灵敏度，它允许低至 -70 dBm（ 100 pW ）的功率测量。这是独立于信号内容的真功率测量吗？如果我们把二极管公式（见Agilent应用指南64-1A）展开为功率级数，就能发现直至约 -20 dBm，经整流的输出电压都是输入信号电压平方的函数。从这一特性可得到整流输出正比于RF信号的功率，而与信号内容无关。随着功率级增加至大约 -20 dBm，整流过程变得越来越线性，而输出电压变成输入电压的函数。对于复杂信号，输出取决于输入信号各种成分间的相位关系。

有多种类型的二极管被用于功率测量，今天使用最多的是低势垒肖特基二极管。我们在这里将讨论在Agilent二极管传感器中使用的二极管类型，这就是PDB（平面掺杂势垒）二极管。PDB二极管在微波频率有比肖特基二极管更好的性能。基于该技术的传感器能在高达 18 GHz 时检测和测量低至 -70 dBm 的功率。与前面介绍的热偶相比，PDB二极管技术提供3000倍（ 35 dB ）的更高效RF-DC转换。二极管传感器技术更为灵敏，而热偶传感器的一项主要优点是在 -30 至 $+20$ dBm 范围保持纯平方律检测。

在检测 -70 dBm 功率级时，二极管探测器的输出约为 50 nV 。如此低的信号电平要求复杂的放大器和斩波器电路设计，以防止对所关注信号的泄漏、噪声和热偶效应。

更宽的动态范围

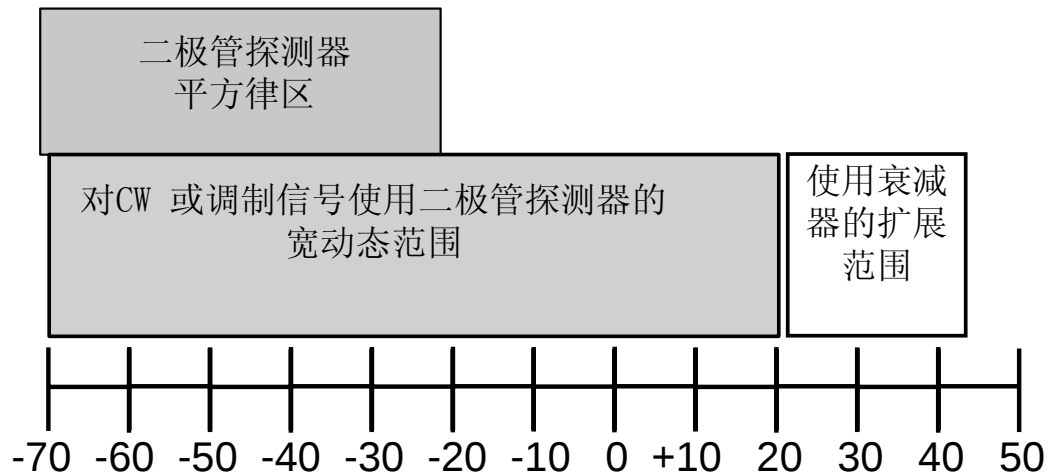


可以对CW进行校正，但也能对可能被调制的信号这样做吗？E9300功率传感器是二极管功率传感器，它可提供80dB的动态范围。为得到这样的动态范围，使用了包括低功率通路和高功率通路的双通路设计。这一创新设计是基于堆叠 / 衰减器二极管的堆叠拓扑。

各二极管堆构成测量通路，高功率通路在-10至+20dBm之间，而低功率通路在-60至-10 dBm 之间。任何时间只有一条通路有效，通路间的切换快速、自动，并对用户透明。这种拓扑方式具有永远保持检测二极管在其平方律区的优点，所以只要选择正确的量程，就能正确响应复杂的调制制式。

通过在单个二极管的位置放置二极管堆进一步优化设计，以牺牲灵敏度为代价为更高功率级扩展平方率范围。在E9300中，低功率通路使用2个二极管的堆叠对，而高功率通路则使用5个二极管的堆叠对。在不使用时，FET开关切断芯片，使低功率通路二极管自偏置至关断条件。

比较传感器 – 功率范围



热敏电阻有高精度，但与热偶或二极管探测器传感器相比，在工作范围上有更多的限制。热敏电阻座的工作范围为-20dBm至+10dBm。

热偶覆盖很宽的功率范围。其真平方律区为-30dBm至+20dBm，使用衰减器时可达到+44dBm。Agilent热偶传感器的3个产品族覆盖整个-30至+44dBm范围。A系列覆盖-30至+20dBm，H系列覆盖-10至+44dBm，B系列覆盖0至+44dBm。

二极管探测器（D系列）有最好的灵敏度，因而能在-20dBm（规定量程为-70至-20dBm）以下工作，但在-20dBm以上就开始偏离平方律探测区域。

宽动态范围功率传感器是二极管传感器，它能提供高达90dB的动态范围。使用校正偏差（CW功率传感器）或允许调制测量的双通路技术。实现最大功率为+44dBm的宽动态范围测量。

好传感器的特性



- 传感器二极管始终处于平方律区。
- 对具有高峰均比信号的精确测量。
- 使用任意宽的调制带宽精确测量信号。
- 平坦的校准因素，提供多音信号的精确测量。

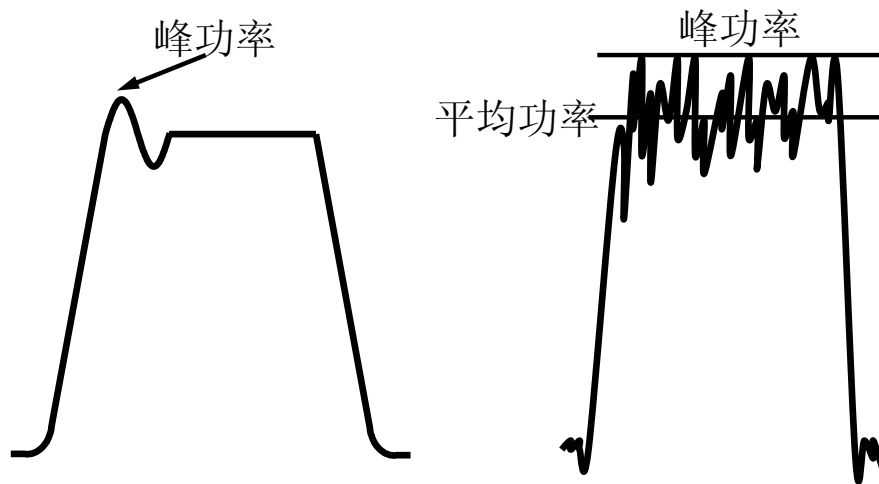
如上所述，堆垒 / 衰减器 / 二极管技术具有始终在平方律区使用二极管的优点。

在该区域内，各二极管的输出电流（和电压）正比于输入功率。这样，**E9300**功率传感器就精确响应所测的平均功率，信号范围从最复杂的数字制式至**CW**。这意味着单是**E**系列**E9300**功率传感器就能测量任何信号的平均功率。

E9300功率传感器能以小于**10 μ s**的持续时间处理高达**+33dBm**的功率级，表明这种功率传感器能用于高波峰因素（或峰均比）的信号。如果不能处理高的峰值，就会严重限制功率传感器的动态范围。

事实上，这也表明纯二极管传感器在用于采样技术方面也没有调制带宽的限制。**E9300**功率传感器有平坦的校准因素，这在测量多音信号方面是一个优点。如果有多音信号输入，就只有一个校准因素可供选择。如果在测量的整个频率范围没有平坦的校准因素，测量结果就得不到好的不确定度。

峰功率测量



脉冲功率传统上是测量脉冲的平均功率，然后除以测量得到的脉冲占空比，从而得到脉冲功率读数。测量结果是脉冲功率的数学表示，而并非真实的测量，并且需假定有恒定的峰功率。脉冲功率平均脉冲中的任何畸变，如过冲或振铃。因此它被称为脉冲功率，而不是峰功率或峰脉冲功率。

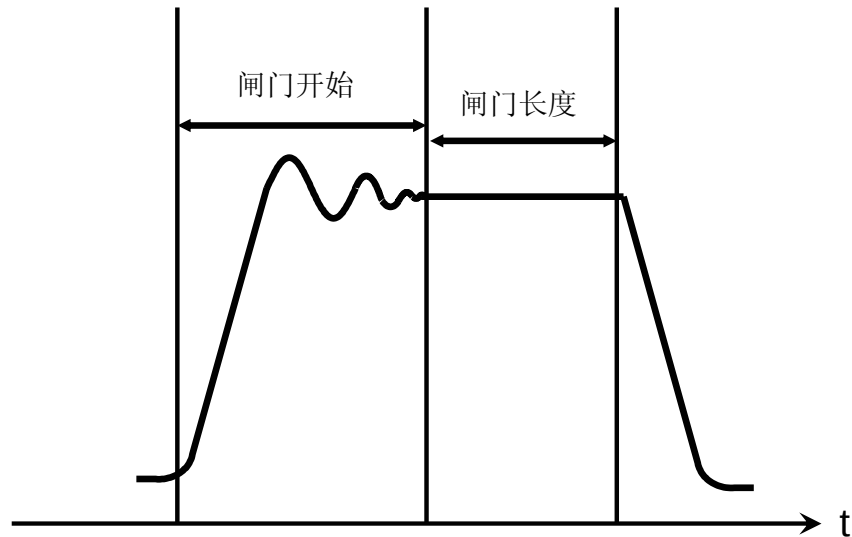
为了保证精确的脉冲功率读数，输入信号必须是矩形波。其它脉冲形状（如三角或高斯）将造成不正确的结果。这种技术不适用于占空比并非常数，而且脉冲幅度和形状均为变量的数字调制系统。

对于复杂数字调制信号，需要进行瞬时功率测量。因此用专门的峰功率计提供宽动态范围包络功率的校准检测。像平均功率计一样，通过提供低SWR和补偿频率及温度变化而将传感器误差减到最小。

CDMA和W-CDMA通常需要峰均比测量。为此，要进行平均功率测量和峰功率测量，并在测量仪器中计算比值。

时间选通功率测量

时间选通功率测量

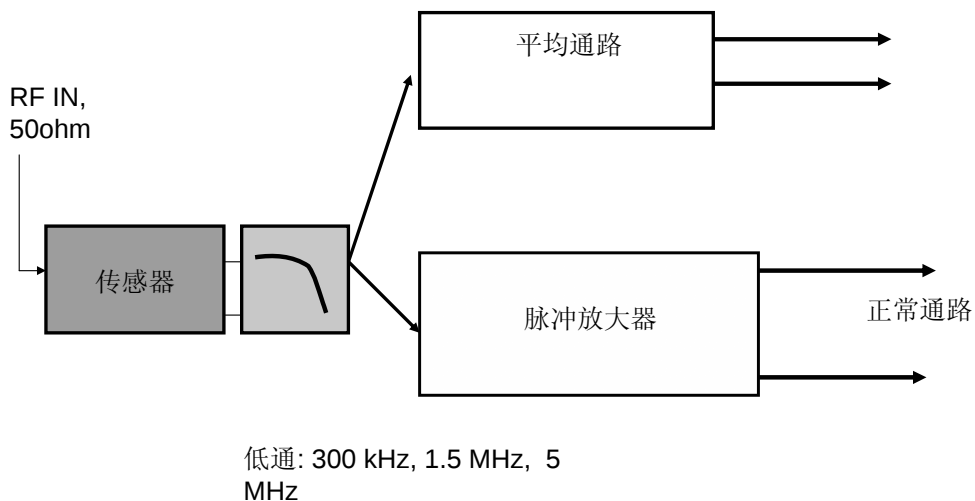


平均功率定义为在信号最低频率的多个周期上平均的能量传输率。

对于AM信号，是在多个调制周期上取平均，对于脉冲信号，则是在若干脉冲重复上取平均。在所有功率测量中，平均功率是最经常的测量，因为容易得到具有高精度和可溯源的测量设备。

EPM-P系列功率计具有20 Msamples/s连续采样率，它允许精确的脉冲成形，和利用功率计的各种触发特性，如外部TTL兼容触发输入、内部（电平）和GPIB触发，以及进行多至4个同时的时间选通测量。可设置单独的开始（选通开始）和持续时间（闸门长度），使用户在规定的时间周期上测量平均功率、峰功率或峰均比。

峰功率测量

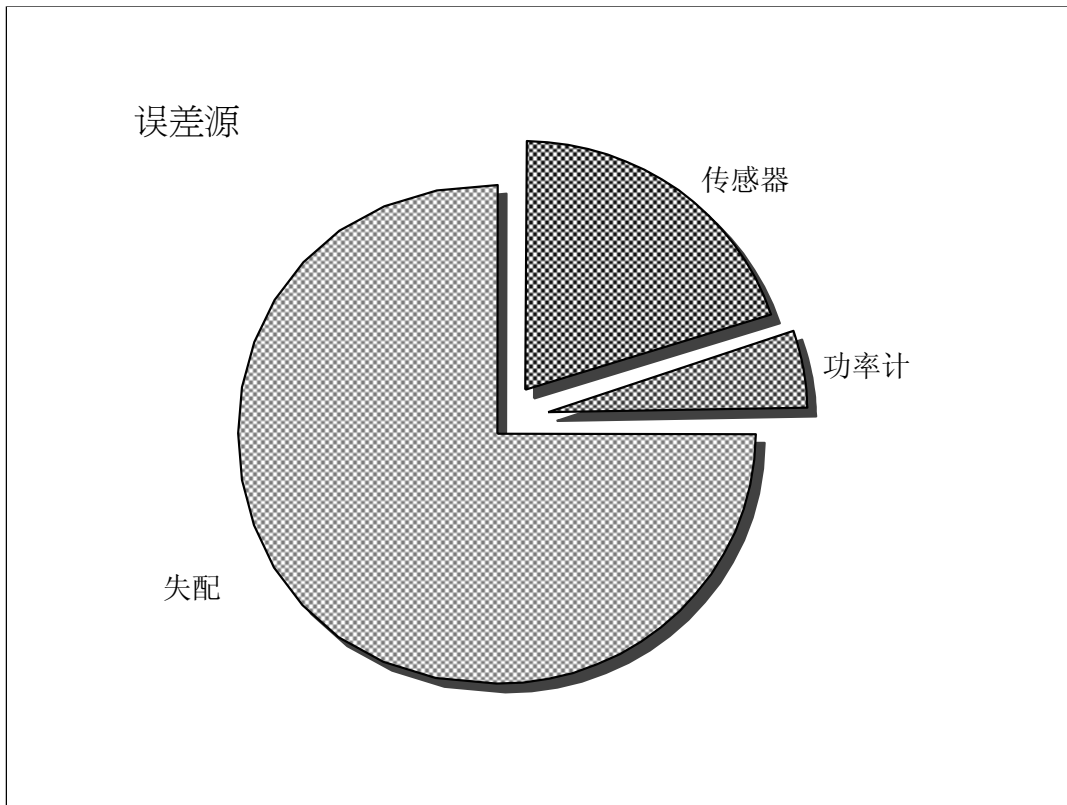


这张幻灯片显示Agilent新E9320峰值和平均值功率传感器家族的简化框图。E9320峰值和平均值功率传感器与EPM-P系列功率计（E4416A单通道和E4417A双通道）兼容，能对今天和未来无线通信系统，如TDMA、CDMA和W-CDMA中使用的复杂调制制式进行峰功率、峰均比、平均功率和时间选通测量。

峰功率和平均功率传感器专用于表征脉冲和复杂调制信号。E9320传感器可适应双音工作，Normal适用于大多数峰功率和平均功率测量，Average仅适用于低电平或CW信号功率测量。这两种模式使用相同的二极管传感器元件。由2个按不同数据要求优化的放大通路进行信号处理。在Average模式中，放大和斩波参数与上面介绍的宽动态范围相同，CW二极管传感器具有-65至+20dBm的典型动态范围。

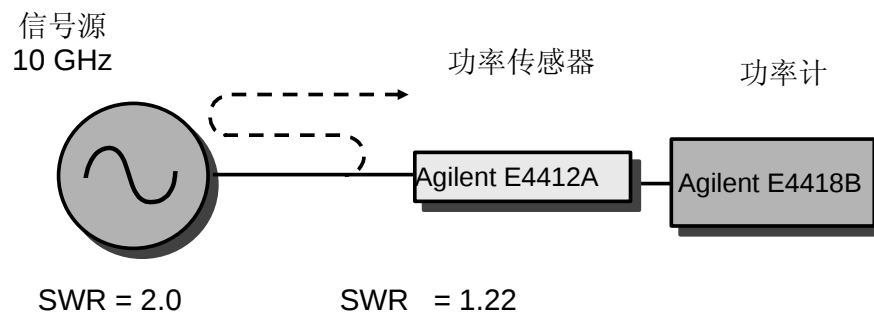
在Normal模式中，隔离通路脉冲放大器提供300kHz、1.5MHz和5MHz带宽，使用户能把测试信号调制与仪器数据处理相匹配。因此，该功率计能测量突发平均功率和峰功率，计算峰均比，在功率计的LCD屏幕上显示其它时间选通脉冲形状。它也能测量和显示包含达5MHz带宽频率成分的其它复杂宽带调制制式。

Agilent E9320峰功率和平均功率传感器家族目前覆盖50MHz至6GHz和18GHz的频率范围。



功率测量和所有其它测量一样，存在着许多误差源。传感器和源阻抗的失配通常造成最大的功率测量误差。通过了解传感器和源的 SWR （驻波比），就能找到失配造成的不确定度。也应考虑效率和校准因素这些传感器的其它不确定度。最后，示出包含总不确定度所有误差的一个例子。

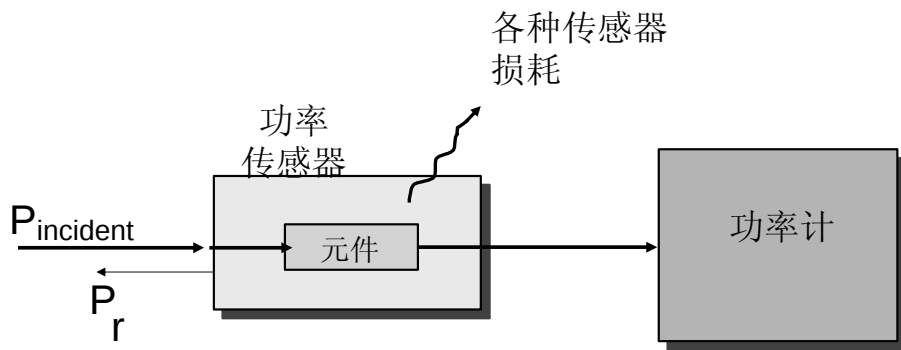
失配总意味着 ... 不确定度



在功率测量中我们通常关注的是向 Z_0 阻抗提供的功率，因此很自然希望功率传感器能尽可能接近 Z_0 。当传感器是精确的 Z_0 时，信号就完全没有反射，而全部被传感器吸收。任何对该阻抗的偏离都会产生反射。这意味着有部分来自源的功率不能到达检测元件（因此不可能被测量）。源的不匹配同样也会产生反射。实际并不知道进入传感器的精确功率级，因为不可能知道复杂的反射系数，而只知道SWR。虽然不能确定精确功率，但能计算出功率的最大和最小值。

失配不确定度是源和传感器不完美匹配造成的不确定度。可使用传感器和源的已知 SWR 值确定失配不确定度的大小。Agilent E4412A功率传感器在10GHz时的SWR为1.22，源的SWR为2.0。可使用图中的公式确定百分失配不确定度。在这一例子中，失配对测量的不确定度贡献为6.6%。

校准因素



$$\text{校准因素} = \frac{P_{\text{metered}}}{P_{\text{incident}}} * 100\%$$

功率传感器的功率输入是提供为传感器的净功率，它等于入射功率减反射功率。但传感器元件不能耗散进入传感器的全部功率。部分功率会在传感器所在仪器中转化为热量。仪器指示的功率仅为检测元件本身耗散的功率。

校准因素**Kb**考虑了传感器不完美的效率，并计入反射信号的失配损耗。每个传感器都有自己的校准因素，该系数由制造商在生产线上确定。校准因素打印在标签上，其数据表随传感器发送。对某种型号的传感器来说，校准不确定度是一致的，并由制造商规定。对于**E4412A**，10GHz时的校准因素在0dBm处为**3.1%**。

由于校准因素校正数据在手动校准中很少使用，因此**Agilent E**系列传感器不再在传感器标签上列出。该数据总是在开机时，或连接新传感器时上载至功率计。新传感器保存2种不同输入功率级的校准因素表，以改进校正例程的精度。如果因修理或重校准而改变了校准因素，新值将加载至传感器**EEPROM**。

$$Kb = \eta e \frac{P_{gl}}{P_i}$$

$$\eta e \quad \frac{P_{gl}}{P_i}$$

功率计的仪器不确定度



有几种与功率计内部电路相关的不确定度。这些不确定度应包括在对不确定度的完整分析中，虽然它们一般比失配和源不确定度小得多。

功率基准不确定度 热偶或二极管传感器需要用高精度的已知功率源验证和调整各传感器的灵敏度。**Agilent E4418B**功率计有**1.0mW**，**50MHz**功率源。功率基准不确定度处理功率源输出的不确定度。**E4418B**功率基准的指标为年**1.2%**不确定度。

仪器不确定度 仪器不确定度是诸多因素的组合，如仪表跟踪、电路非线性，量程改变时衰减器的不精确，以及放大器增益不确定度。仪器制造商保证累计不确定度在特定的极限之内。对于**E4418B**，仪器不确定度为**+/- 0.5%**。

计算不确定度

失配不确定度: $\pm 6.6\%$

校准因素不确定度: $\pm 3.1\%$

功率基准不确定度: $\pm 1.2\%$

仪器不确定度: $\pm 0.5\%$

现在要确定不确定度，如何组合呢？

这是我们功率测量例子中各种最大的不确定度源。现在我们要确定这些不确定度如何在一起影响最终测量结果。功率测量不确定度通常可使用下面两种方式表示：最坏情况和均方根和（**rss**）。让我们考察这二种方法。

对于这一例子，应注意上面列出的不确定度对于**10GHz**为**10dBm**。功率计基准和仪器不确定度是制造商为功率计整个工作范围规定的不确定度。校准因素不确定度按传感器工作范围内的不同频率点规定，可在传感器的技术指标中找到。失配不确定度取决于源和传感器的**SWR**。传感器在特定频率范围的最大**SWR**可在技术指标中找到，并可从源的技术指标中找到源的 **SWR**。

该功率级（**10dBm**）不包括调零误差和噪声。在更低的功率级，例如对于二极管传感器低于**-60dBm**时，这些误差可能非常显著，应包括在任何不确定度分析中。

最坏情况

在我们的例子中，最坏情况的不确定度应为：

$$= 6.6\% + 3.1\% + 1.2\% + 0.5\% = \pm 11.4\%$$

$$+11.4\% = 10 \log (1 + 0.114) = \boxed{+ 0.47 \text{ dB}}$$

$$- 11.4\% = 10 \log (1 - 0.114) = \boxed{- 0.53 \text{ dB}}$$

在功率测量中，总不确定度经常使用的一个值是最坏情况不确定度。此时所有可能的误差源均处于其极端值，并在同一个方向，使测量值和实际功率值之间产生最大的偏离。

最坏条件法得到的不确定度为 $\pm 11.4\%$ ，或 $+ 0.47, - 0.53 \text{ dB}$ 。

注意：所有误差相加的情况极为罕见，因此最坏情况法是非常保守的。

均方根和

RSS（很类似）不确定度应为：

$$= \sqrt{(6.6\%)^2 + (3.1\%)^2 + (1.2\%)^2 + (0.5\%)^2}$$

$$= \pm 7.4\% \text{ which is,}$$

$$+ 7.4\% = 10 \log (1 + 0.074) = + 0.31 \text{ dB}$$

$$- 7.4\% = 10 \log (1 - 0.074) = - 0.33 \text{ dB}$$

最坏情况不确定度是非常保守的方法。每一种误差源的值接近于极端值和在所可能最坏方向的概率极低。

一种较为现实的组合不确定度方法是均方根和（*rss*）法。*rss*不确定度是基于大多数测量误差是系统和非随机的、也是彼此独立的。由于它们彼此独立，因此其组合可看成是随机变量。

误差的*rss*组合法得到总不确定度为

$$\pm 7.4\%, \text{ 或 } + 0.31, - 0.33 \text{ dB.}$$

您可在Agilent应用指南64-1A“射频和微波功率测量原理”中找到计算不确定度的更严格方法。这一方法遵从美国国家标准化所和国家标准实验室会议（ANSI/NCSL）颁布的导则，该导则目前已在工业界和政府的许多计量工作中实施。

总结

- 高频时的电气通路变成了传输线。
- 高频时，功率是更为有用的测量。
- 功率可以是绝对值或相对值。
- 功率计是测量功率最精确工具。
- 功率计中的不确定度主要来自传感器和失配。

我们将总结这一教学模块。我们已了解为什么在高频时要用功率测量来代替电压和电流测量。

我们也用dB代替W来测量功率，这是因为使用相对单位的方便性。它也可简化数学运算。容易地表示很大或很小的量。

测量功率有几种可选择的仪器，其中功率计最为精确。功率计用传感器把入射高频信号转换为可测量的电压。

产品和资源



EPM Series Power Meters

- 单通道和双通道功率计
- 平均功率测量
- 快测量速度
- 功率范围 -70 至 $+44$ dBm（取决于传感器）



EPM-P 系列功率计

- 单通道和双通道功率计
- 同时的峰值、平均值和峰均比测量
- 时间选通测量
- 在GPIB上的快传输
- 功率范围 -70 至 $+44$ dBm（取决于传感器）



众多的功率传感器

- 单通道和双通道功率计
- 平均功率测量
- 快测量速度
- 功率范围 -70 至 $+44$ dBm（取决于传感器）

产品和资源

产品信息：

- 功率计和传感器信息：www.agilent.com/find/powermeters

应用资源：

<http://www.measurement.tm.agilent.com/new/category719.html>

- 应用指南 64-1C 射频和微波功率测量原理（文献号：5965-6630E）
- 应用指南 64-4D 进行更好功率测量的4个步骤

需要产品资料或应用指南吗？请向我们发Email tm_ap@agilent.com

这样我们就结束了这一教学模块。当您寻找功率计时，请关注Agilent EPM和EPM-P功率计。EPM系列是平均功率计，有单通道和双通道的型号。

也请关注Agilent宽量程传感器——可覆盖至几GHz的毫米波范围，灵敏度达-70dBm。我们的传感器还包括宽动态范围传感器和峰功率传感器。

如果您想了解更多功率计或应用提示，请使用上面列出的资源表。

您也可和我们的培训工程师联系，请向我们发E-mail，地址为：tm_ap@agilent.com。您可在这里申请产品资料，报价，得到对产品使用、应用领域等问题的回答。

RF & Microwave e-Academy Program

Powerful tools that keep you on top of your game

教育模块结束。
感谢您的关注。

还有问题吗？需要帮助吗？需要更深入了解吗？

如果您有进一步的问题，请向我们发 email tm_ap@agilent.com。如果您想更多了解我们的教育课程，请访问
www.agilent.com/find/education:cn

请经常查看Agilent网络研讨会，了解更新情况和新的教育模块。



Agilent Technologies

Technical data is subject to change. Copyright©2004 Agilent Technologies
Printed on Jan, 2004 5988-8493CHA

要了解更多信息，请按上面所列的地址向我们发E-mail。如果您希望更详细了解功率计或其它Agilent产品，请在上面的URL中查看我们的培训课程。这些收费课程由我们的专家讲授，使您有机会深入学习和实际动手操作仪器。

最后，请在网络研讨会上再次访问我们。您将有可能找到新的教学模块、材料，甚至可能有特价产品！