

负载牵引测试平台

1 背景

源/负载牵引测量是与输入/输出阻抗相关的测量。通过改变源/负载阻抗，测量输入功率、输出功率、功率附加效率、杂散、噪声系数、EVM、ACPR 等参数，得到该参数与输入/输出阻抗的关系。源/负载牵引测量为大功率、高效率、强非线性或低噪声器件的建模和设计提供了依据。

基于 R&S 矢量网络分析仪、频谱仪、信号源、功率计与 Focus Microwave 的各种阻抗调谐器及相应分析软件的解决方案，广泛应用于移动通信、航空航天/国防、通用电子器件等领域。

本文档介绍源/负载牵引测量的基本原理及测量系统配置。

1 源/负载牵引测量

1.1 常见的源/负载牵引测量：

1.1.1 源/负载牵引功率测量

对于非线性器件，如高功率放大器、高功率晶体管（场效应管）等，其源阻抗也具有非线性，且与负载阻抗有关。不能使用固定负载阻抗进行源阻抗测量。同样的，负载阻抗特性与源阻抗亦相关，不能采用固定负载阻抗（如 50 欧姆）进行源阻抗特性的测量。

源/负载牵引功率测量中，待测件的源/负载阻抗可通过 Tuner 设置，从而得到待测件在不同源/负载阻抗条件下的输出功率等参数。源/负载牵引测量在大功率、高效率功率器件建模和设计中被广泛采用。

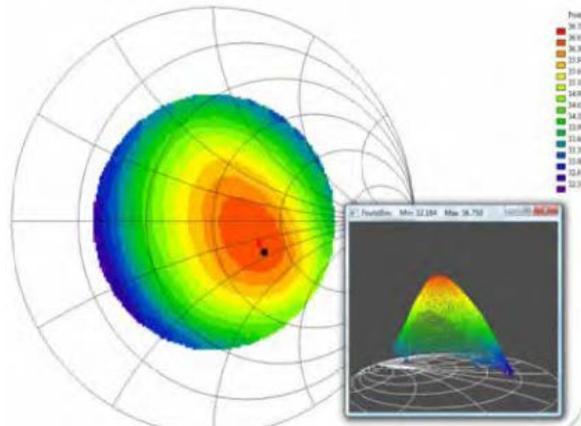


图 1 典型的源/负载牵引功率测量结果

1.1.2 噪声参数测量：

一个二端口网络的噪声系数与源阻抗有关，根据 H.Rothe 和 W.Dahlke 提出的二端口网络的 R_n - G_n 噪声模型，推导出二端口噪声网络的噪声系数可表示为：

$$F = F_{\text{Min}} + \frac{R_n}{G_s} \left[(G_s - G_{\text{opt}})^2 + (B_s - B_{\text{opt}})^2 \right]$$

式中， F 为二端口噪声网络噪声系数， F_{Min} 为最小噪声系数， R_n 为等效噪声电阻， G_{opt} 为最佳源电导， B_{opt} 为最佳源电纳， G_s 为源电导， B_s 为源电纳。其中 F_{Min} 、 R_n 、 G_{opt} 和 B_{opt} 称为噪声参数，完全取决于二端口网络自身的噪声特性，与该网络工作状态和



工作频率有关，而与外电路无关。

当输入端的源导纳 $Y_s = G_s + jB_s = G_{opt} + jB_{opt}$ 时，整个网络得到最佳噪声系数 F_{Min} 。从上式还可以看出，等噪声系数曲线是以 (G_{opt}, jB_{opt}) 为圆心的一组圆。

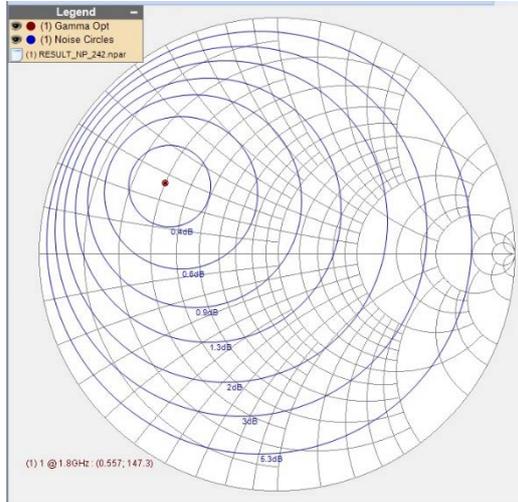


图2 噪声参数

从二端口噪声网络的噪声系数公式可以看出，通过测量四个不同源阻抗条件下的噪声系数，即可计算出四个噪声参数。实际测量中往往会测量较多的阻抗条件，利用统计方法计算噪声参数。

噪声参数测量中一般只使用源 Tuner，用于产生不同的源阻抗，噪声系数的测量可以采用信噪比法、Y 因子法和冷源法等方法。由于各种方法测量的都是包含 Tuner 的级联噪声系数，因此在数据处理中需要根据级联噪声系数公式，计算待测件在该阻抗下的噪声系数。

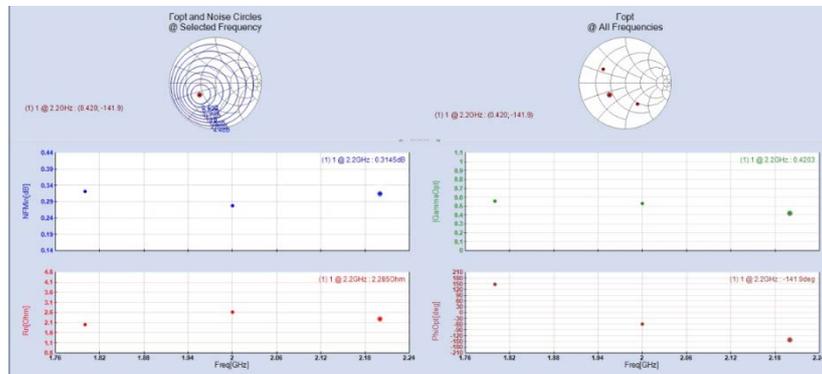


图2 典型噪声参数测量结果

1.2 源/负载牵引测量系统：

1.2.1 基于 ZNA 矢量网络分析仪的负载牵引测量系统：

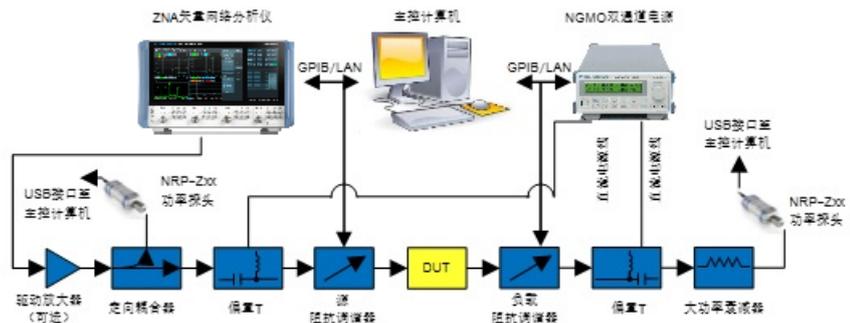


图3 基于 ZNA 矢量网络分析仪的负载牵引测量系统

基于 ZNA 矢量网络分析仪的传统负载牵引测量系统中，ZNA 矢量网络分析仪用于 Tuner 校准并在测量中作为信号源使用。由于 ZNA 矢量网络分析仪采用多源结构，该系统可以很方便的扩展为双音测量系统。

NRP-Zxx 系列功率探头使用方便，可通过 USB 接口连接到主控计算机或 ZNA 矢量网络分析仪，用于测量待测件的输入输出功率。

源/负载阻抗调谐器采用 Focus®CCMT 系列阻抗调谐器，实现负载阻抗变化。

在此系统基础上，可以扩展出多种测量系统：

■ 谐波负载牵引测量系统：

如何提高功率放大器的效率是设计师十分关心的问题。最近几年，谐波负载牵引测量系统被越来越多的功放设计师接受和认可。功率放大器设计时谐波阻抗匹配能够在很大程度上提高功率附加效率。以二次谐波阻抗为例，在二次谐波反射系数幅度固定条件下，相位的改变可引起约 10%左右的效率变化。

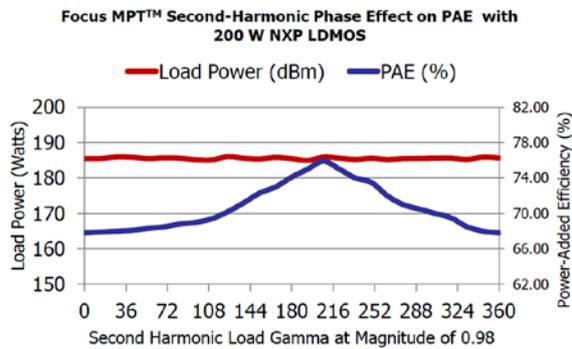


图3 二次谐波处的阻抗相位对 PAE 的影响。

在图 3 所示的系统中，将负载端的阻抗调谐器升级为谐波阻抗调谐器即可实现谐波负载牵引测量系统。

■ 脉冲负载牵引测量系统

功率放大器往往需要在脉冲条件下测量。一方面这一类功率放大器通常不能用于连续工作，加电时间过长会造成损坏；另一方面只有在真实的工作条件下，才能准确反映器件的性能。

使用 R&S®ZNA-B4X 矢量网络分析仪选件和 Focus®GatePulser 模块，可以很方便地完成脉冲负载牵引测量



图4 脉冲负载牵引测量系统所需附件

■ 在片负载牵引系统



图5 在片负载牵引测量系统

现代无线系统都在追求小型化，因此在片器件测量和设计越来越受到重视。对于在片负载牵引系统，探针及连接探针的电缆在很大程度上减小了 Tuner 的阻抗调谐范围。

为此 Focus®公司采用 Bend-line 空气线与探针做硬连接，并可增加预匹配配件，从而提高 Tuner 的最大反射系数。

■ 矢量接收机负载牵引系统

在传统负载牵引系统中，待测件输入阻抗是未知的，需要通过调整源阻抗调谐器实现输入端最大功率传输，而由于阻抗误差造成的失配以及不同功率下待测件输入阻抗的变化会给测量带来较大的误差。基于矢量网络分析仪的矢量接收机负载牵引系统中，可以实时测量待测件的输入输出功率及源端、负载端的反射功率，使测量更加准确。利用 R&S®ZNA-B16 选件，可以很方便的搭建矢量接收机负载牵引系统。

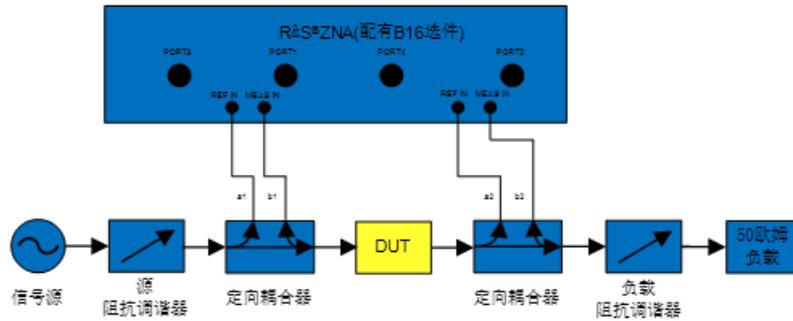


图6 矢量接收机负载牵引测量系统

■ 混合型 (Hybrid) 负载牵引系统

毫米波频段测量、在片测量等应用中，电缆、探针等损耗会减小 Tuner 的阻抗调谐范围，传统的纯机械式负载牵引系统无法满足客户的需求，混合型负载牵引系统可以很好的解决这个问题。混合型负载牵引系统以矢量接收机负载牵引系统为基础，采用机械式 Tuner 调谐与有源负载牵引结合，在基波频率上增加有源负载牵引功能。由于基波上有机调谐器做预匹配，因此不需要大功率反向放大器。谐波阻抗调谐使用机械 Tuner 实现。

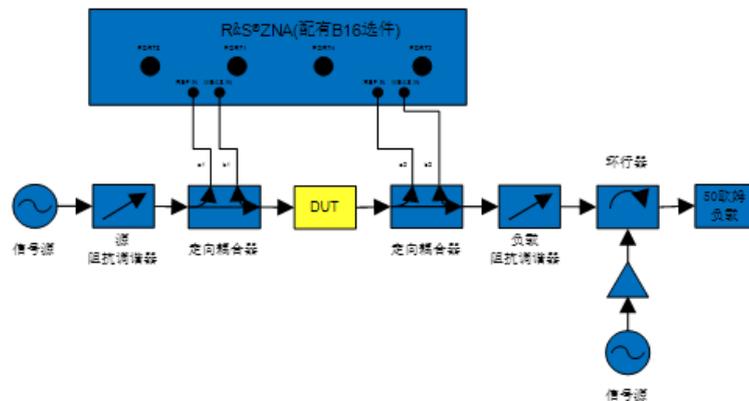


图7 混合型负载牵引测量系统

1.2.2 基于 ZNA 矢量网络分析仪的噪声参数测量系统：

利用 ZNA 矢量网络分析仪的 R&S®ZNA-K30 选件，使用单台仪表与 Tuner 配合，即可完成噪声参数测量。

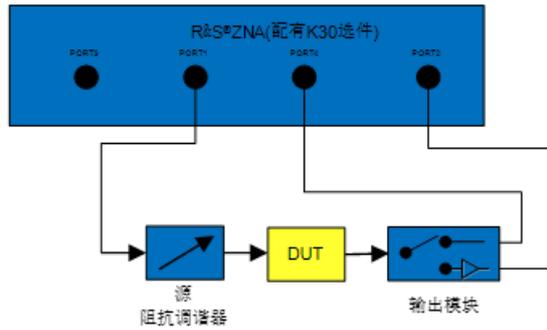
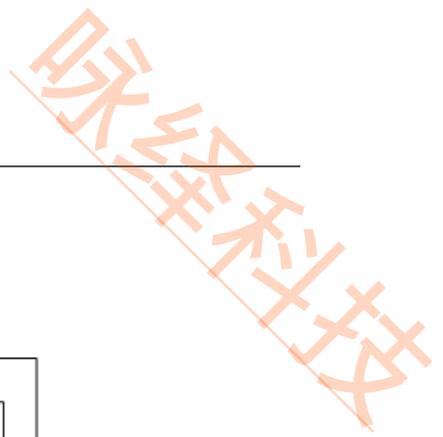


图 8 基于 ZNA 矢量网络分析仪的噪声参数测量系统

源阻抗调谐器采用 Focus®CCMT 系列阻抗调谐器，实现源阻抗变化。输出模块（Output Noise Module）为可选配置，内置低噪声放大器和切换开关，可提高系统测量超低噪声器件的能力。

1. 2. 3 手机终端测量负载牵引测量系统：

Tuner 可以用来模拟手机天线阻抗幅度和相位的变化。结合手机综测仪，可以验证手机在不同阻抗下的收发性能，从而根据发射功率、接收机灵敏度、ACPR 及直流电流等参数优化手机设计。

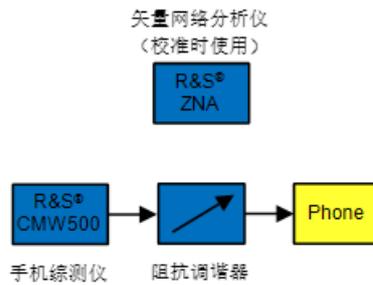


图 9 手机终端负载牵引测量系统

2 配置信息

矢量网络分析仪基本单元	
R&S®ZNA	矢量网络分析仪
R&S®ZNA-B16	源和接收机直接接入选项
R&S®ZNA-B4X	脉冲源选项
R&S®ZNA-K30	噪声系数测试选项（未上市，后续将推出）
校准件	
R&S®ZN-Z53	300 kHz 到 3 GHz
R&S®ZN-Z54	10 MHz 到 40 GHz
R&S®ZN-Z55	10 MHz 到 50 GHz
阻抗调谐器（Turner）	
Focus®CCMT 基波阻抗调谐器	0.4-18 GHz、2-40 GHz、2-50 GHz、8-65 GHz
Focus®MPT 谐波阻抗调谐器	0.8-18 GHz、2-36 GHz、3-40 GHz、8-50 GHz
测量软件	
FDCS 负载牵引测量软件	