

非线性测试平台

1 背景

大功率器件是射频和微波通信系统中核心的组成部分，手机、基站和卫星通信系统中都会用到大功率放大器，表征这些大功率器件的线性和非线性特性是产品设计和验证过程中非常关键的环节。为此，多家公司推出了基于多谐波失真模型（Polyharmonic Distortion Modelling，简称 PHD）的非线性模型。这些模型都是对小信号 S 参数在大信号激励下的数学扩展，能够精确地仿真出各种射频参数，如：输出功率、附加效率、增益压缩、动态负载线等。

本文档介绍非线性测量的基本原理及 Cardiff 模型，包括简化模型（Cardiff Model Lite）和完整模型（Cardiff Model Plus）、基于测量的建模方法和模型使用。

2 非线性模型

2.1 多谐波失真模型

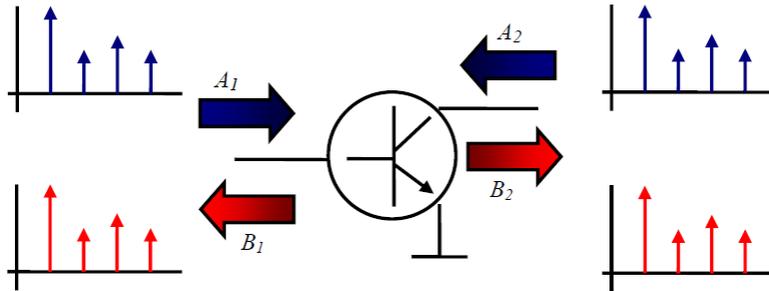


图1 多谐波失真模型

多谐波失真模型是一种频域行为模型，其主要思想是通过测量被测器件输出端的信号特性，在频域分析其与输入信号各次谐波之间的关系来描述被测器件的特性。

如图 1 所示 A_1 为大信号激励信号； B_1 为入射端的反射信号； B_2 为输出端的响应信号； A_2 为由于负载不匹配再次反射到被测件的激励信号。 A_1 、 A_2 、 B_1 、 B_2 都包含基波和谐波成分。为了表征被测器件的非线性，需要测量每一个基波和谐波的幅度和相位，以及相互之间的激励-响应关系：

$$B_{1k} = F_{1k}(DC, A_{11}, A_{12}, A_{13}, \dots, A_{21}, A_{22}, A_{23}, \dots)$$

$$B_{2k} = F_{2k}(DC, A_{11}, A_{12}, A_{13}, \dots, A_{21}, A_{22}, A_{23}, \dots)$$

式中： A_{ph} 代表非线性激励信号，下标 p 表示测量端口，下标 h 表示谐波次数； B_{ph} 代表非线性响应信号，下标 p 表示测量端口，下标 h 表示谐波次数。

Mesuro 公司 Cardiff Model 系列就是基于多谐波失真模型的一种商用解决方案。

2.2 Cardiff 模型：

Cardiff 模型由英国 Cardiff 大学（Cardiff University）Tasker.P.J 教授提出并实现，分为简化版的 Cardiff Model Lite 和完整版的 Cardiff Model Plus。

2.2.1 Cardiff Model Lite：

Cardiff Model Lite 基于多谐波失真模型的三阶多项式展开式和谐波叠加原理，允许在大信号激励情况下扩展 S 参数。

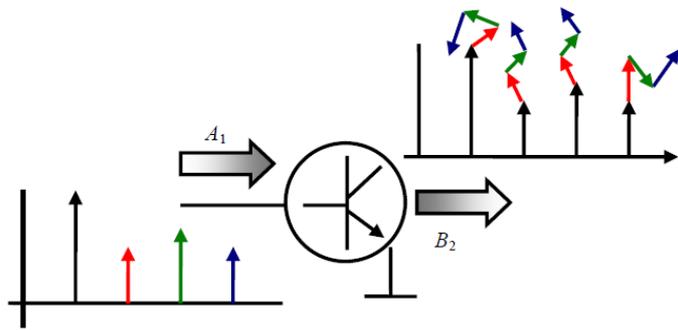


图2 谐波叠加原理

谐波叠加原理如上图所示。首先假设激励信号只存在 A_{11} 分量，此时输入频谱 A_{11} 和其响应输出频谱 B_{2n} 各分量在图中用黑色线表示；接着，保持 A_{11} 分量不变，另加入一个相对较小的分量 A_{12} （二次谐波），它在 B_2 上产生的偏移量用红色线表示；以此类推，三次谐波和四次谐波分量在 B_2 上产生的偏移量分别用绿色和蓝色线表示。按照谐波叠加原理， B_2 各分量上的偏移量均是由各谐波偏移量的线性叠加产生的。经实验验证，在射频功率放大器中，这种分析是成立的。

在 Cardiff Model Lite 建模中，DUT 首先由基波 A_{11} 驱动，在每个基波输入功率下，也会同时在各谐波频率下加入一个小信号 A_{ph} 对器件进行扰动。小信号可由矢量网络分析仪中的第二个源实现，此信号源的相位通过至少 6 个不同的相位点进行扫描，以使模型正确的预测器件性能。

Cardiff Model Lite 的测量系统由 R&S®ZVA 系列矢量网络分析仪和 Mesuro 公司的 MB-MG 信号调理单元及非线性模型提取软件组成：

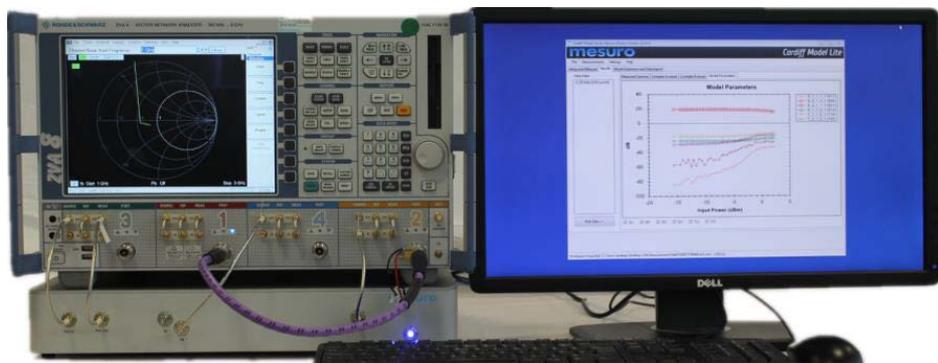


图3 Cardiff Model Lite 测量系统

R&S®ZVA 系列矢量网络分析仪用于产生基波和谐波激励信号，并测量响应信号与激励信号的相对幅度和相位。MB-MG 信号调理单元中包含用于校准谐波相位的相位参考单元及射频信号路由模块。

Cardiff Model Lite 模型为局部模型，仅适用于在以下特定的条件下预测器件的性能：

- $A_{21} \ll A_{11}$
- $Z_L \approx 50\Omega$

2.2.2 Cardiff Model Plus:

Cardiff Model Plus 是基于 PHD 模型的一个更精确、更多阶多项式展开的非线性建模技术，不再使用谐波叠加原理，也就是不再考虑激励谐波分量相对于大信号工作点相应的线性扰动关系，而需要考虑各谐波分量之间的相互混合阶数分量对输出波的影响。Cardiff Model Plus 模型的数学表达式为：

$$b_{p,h} = p^h \cdot f(|a_1|, |a_2|, (Q/P)) = p^h \cdot \sum_{m=-(N+1/2)}^{m=(N+1/2)} \left\{ K_{p,h,m} \left(\frac{Q}{P} \right)^m \right\}$$

其中：

$$K_{p,h,m} = g(|a_1|, |a_2|)$$

式中， a_1 是输入端的大信号激励信号，建立大信号工作点； a_2 是输出端的输出信号再反射到端口的基波激励信号； P^h 是 a_1 的第 h 阶分量的相位， Q 是 a_2 的相位分量； N 代表多项式展开的阶数。实验表明，多项式展开阶数越多，误差越小，但当阶数在6-8阶范围内，误差变化不大。对于功率器件的非线性大信号模型而言，该模型完全满足射频设计师的需求。

Cardiff Model Plus 测量系统如下图所示：

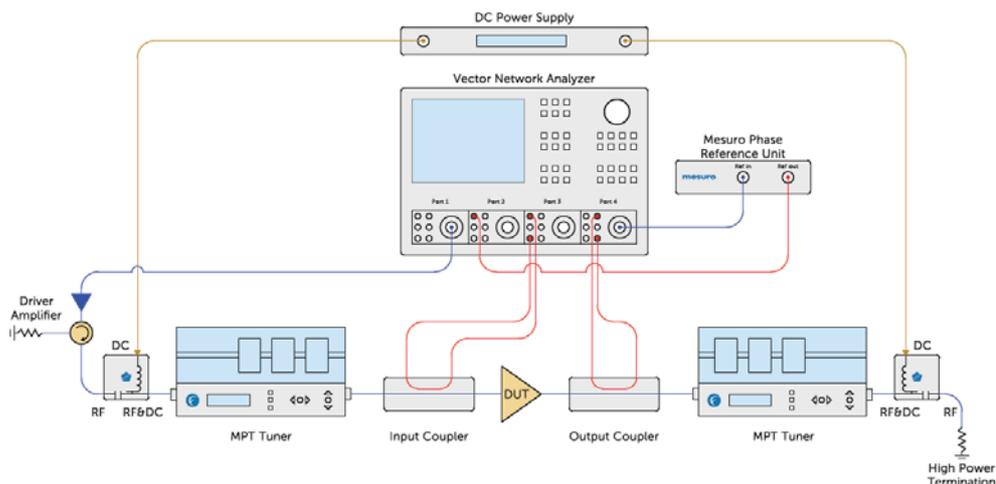


图4 Cardiff Model Plus 测量系统

Cardiff Model Plus 测量系统是基于传统的负载牵引系统的一个升级，由传统的功率测量模式改为基于矢量网络分析仪矢量接收机的测量模式。该测量系统由 R&S®ZVA 系列矢量网络分析仪、Focus®源/负载阻抗调谐器（Turner）、Mesuro 相位参考单元、定向耦合器、Bias Tee、驱动放大器等附件和非线性模型提取软件组成。矢量网络分析仪用于测量 a_1 、 b_1 、 a_2 、 b_2 ，及相位参考单元的的参考相位；阻抗调谐器（Turner）用于改变 DUT 的源/负载阻抗，相位参考单元用于校准谐波之间的相对相位。

Cardiff Model Plus 的优点有：

- 在失配条件下有很高的精度
- 可以很好的预测负载牵引测量区域以外的性能
- 模型文件远小于其他商用 PHD 模型。

2.2.3 Cardiff 模型的使用与验证：

Cardiff Model Lite 测量系统和 Cardiff Model Plus 测量系统均可自动生成模型文件，支持主流的 EDA 软件，如 AWR Microwave office、Keysight Advanced Design System 等。

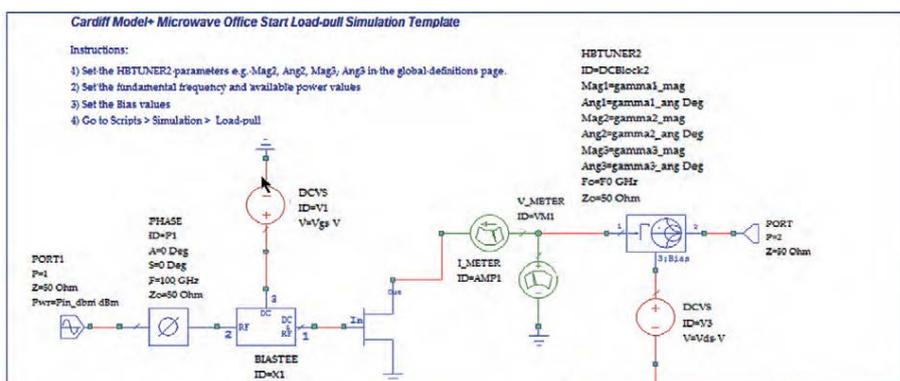


图5 在 EDA 软件中使用 Cardiff 模型

结果表明，Cardiff 模型具有较高的精度：

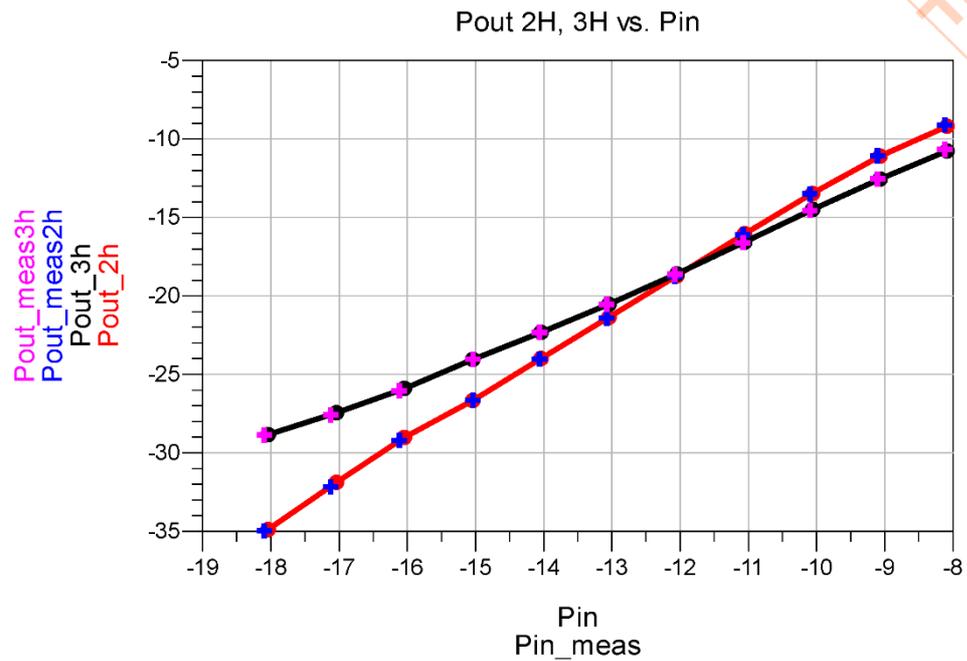


图6 Cardiff Model Lite 模型仿真结果与实测结果比较

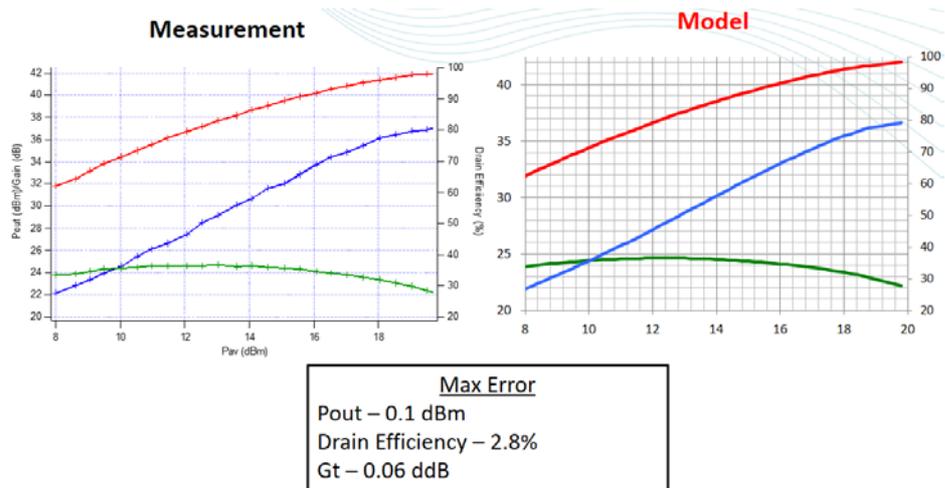


图7 Cardiff Model Plus 模型仿真结果与实测结果比较

3 配置信息

矢量网络分析仪基本单元

R&S®ZVA 矢量网络分析仪

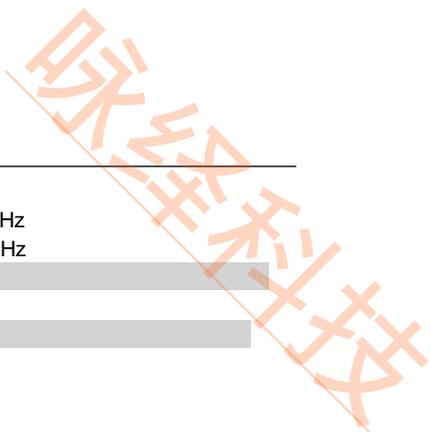
校准件

R&S®ZV-Z53 300 kHz 到 3 GHz

R&S®ZV-Z54 10 MHz 到 40 GHz

R&S®ZV-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
相位参考单元	
Mesuro 相位参考单元	10 MHz-30/50/67 GHz
测量软件	
FDCS 负载牵引测量软件	
MW-MGL 模型提取软件	Cardiff Model Lite 模型提取
MW-MGP 模型提取软件	Cardiff Model Plus 模型提取