

仅采用S参数进行谐波平衡仿真的PA (功率放大器) 设计

PA Design Using Harmonic Balance Simulation With Only S-parameters

作者：Ivan Boshnakov 微波设计工程师

普遍观点认为，单独S参数结合谐波平衡(HB)无法仿真出晶体管的功率性能。本文采用HB仿真，描述了一种设计和仿真放大器最大功率的方法，而此时可用的数据只有晶体管的S参数。当非线性晶体管模型无法获得时，这种方法具有广泛应用性。即便存在非线性模型时，它也非常有益。

这里描述的放大器设计方法是 Steve Cripps 负载线方法的一种扩展，它是对 Pieter Abrie 首次引入的功率参数的扩展。这些技术可以用来产生有用的近似，允许对没有非线性模型的晶体管进行 HB 仿真。本文是 2013 年 4 月发表在 ARMMS 上的一篇文章的续篇。

Cripps 最初的文章发表在 1983 年，当时 HB 仿真还没有使用，负载拉移测量只是确定设备特性时的可选项。Cripps 的文章发表时，HB 仿真已经存在，但速度很慢。Cripps 方法为设计大功率提供了一种极为简单的途径。Cripps 表达了一种期望，希望其方法的简单数

学原理应用到通用线性模仿器中，“目前大多数设备计算噪声系数一样的方法²”。他还说明，“稍微改进一下使用”，当多级设计和潜在的其它放大器有反馈时，这一方法可以应用。不幸的是，他的方法从未在任何通用模拟器中得以实现。但是，它以一种更为先进的方式，在 Pieter Abrie 研发的专用 MultiMatch 放大器设计向导(MultiMatch Amplifier Design Wizard)中得以实现。Abrie 在他的著作中提出了功率参数，并在 MultiMatch 中得以实现，用来设计 A 级和 AB 级放大器。

功率参数的映射函数提高了与晶体管配置有关的任何限制条件，包括信息反馈、电阻性

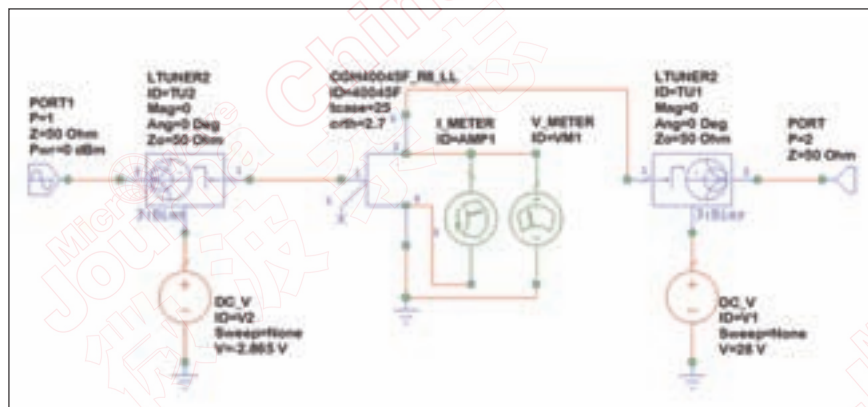


图 1. Microwave Office 的输出级。

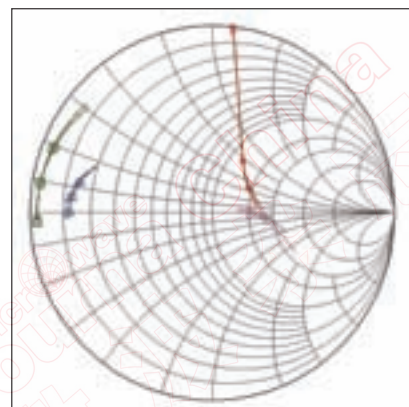


图 2. MultiMatch 中给 S 参数配备线性模型。

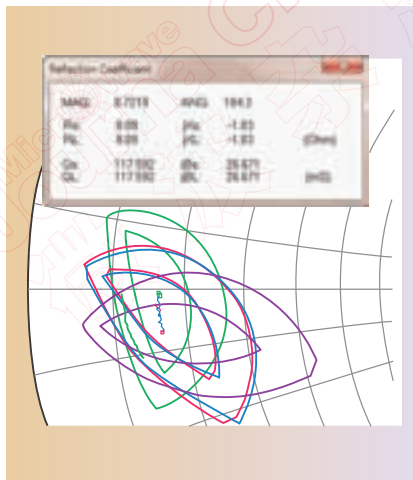


图 3. MultiMatch 中提取的负载拉移轮廓外形图。

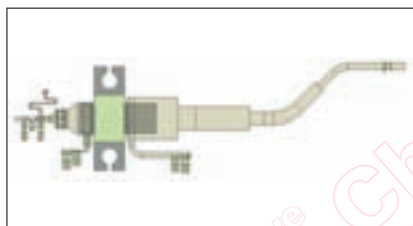


图 4. Microwave Office 中输出级布局图。

负载、接地节点位置、并行单元或芯片、参考平面问题和多级。这与噪声参数有一些有趣的相似性，比如串联反馈使得与最大功率的匹配更为容易。

当前，像 20 年前的线性仿真一样，HB 仿真也发展迅猛。精确的非线性晶体管模型已经开发出来，但还没有提供给许多有用的晶体管。Abrie 的功率参数方法是一种成熟的方法，它可以很容易地用于任何通用模拟器中，加速和提升 P1dB 和 Psat 的设计流程，尤其是在不存在非线性模型的情况下。

0.5~2.5 GHz GaN 功放的设计

采用一个 45W GaN HEMT，改进的 HB 工艺 6 被用来设计三级放大器（覆盖 0.5~2.5 GHz）。除了设计过程外，每级动态加载线的 HB 仿真结果也将显示出来。这将提升对设计过程的理解，并解释当非线性模型不存在时，是如何从晶体管提取所需功率的。

图 1 示出了 NI AWR Microwave Office® 仿真器中设计输出级设计的起始。在一个频段上，晶体管和调谐器的非线性模型可以用来提取最大功率和增益的阻抗。相反，只在晶体管 Imax/2 处的 S 参数被提取出来。S 参数然后被导入到 MultiMatch 以适应线性模型(图 2)。定义了 I-V 曲线(剪切边界)上的最大电流和电压范围后，功率参数被用来提取负载拉移数据(图 3)。然后，合成输出网络来提供负载阻抗（与最大预剪切功率有关），后面接着的输入匹配网络可以提供最大平坦增益和稳定性。MultiMatch 布局可以轻易设计成所需形式，原理图和布局输出到 Microwave Office（图 4）。在 Microwave Office 的辅助下，采用电磁模型或对部分布局进行全面电磁仿真，可以对微带不连续性进行全面仿真。非线性模型和 HB 被用来仿真基础和谐振信号的功率、相关增益和增益压缩、电流、电压以及效率。进行这些仿真后，可以作一些调整以获得最佳性能。输出级设计结束时，两者与混合耦合器进行合成，从而形成一个平衡的输出。

Cree 为设计中所用的 GaN HEMT 提供了非线性模型，可以访问固有发生器的电压和电流，如图 1 所示。对固有发生器电压和电流的仿真——动态负载线 (DLL)，更为形象化和易于理解，可以更好地设计这一功能。在频段上对 A 类和 AB 类（在低功率

电平时发生偏置）所做的仿真 DLL 示于图 5 中，图中表示，A 类偏置能够提供最大电压和电流波动，由此得到最大 Psat。将这些 DLL 与 Psat 时的 A 类和 AB 类 DLL 相比（图 6）。图 7 示出了不同频率范围内 A 类和 AB 类 Psat 和功率增加效率 (PAE) 仿真，两种偏置条件下有大致相同的结果。这表明了这种设计方法的有效性。

两级驱动设计在输出采用 Cree 的 GaN HEMT，它有一个非线性模型，由一个 GaAs HFET 驱动，在 A 类偏置点只有 S 参数。GaN 晶体管的 S 参数在 Microwave Office 中提取，用在 MultiMatch 中的 GaAs 晶体管的 S 参数用来产生这些晶体管的线性模型。定义了电压和电流后，功率参数和合成被用来设计这两个驱动级，从而在频段上能够提供最大功率和平坦增益。

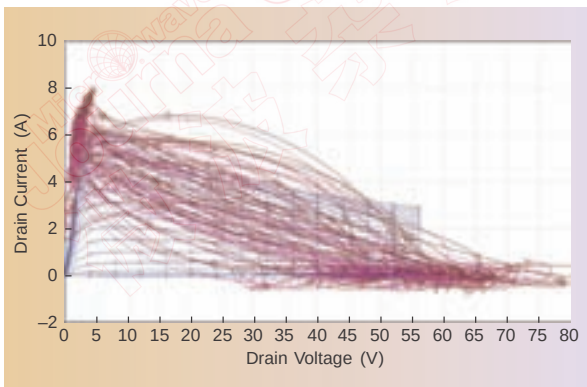


图 5. 低输出功率时的 I-V 曲线和 A 和 AB 类的 DLL。

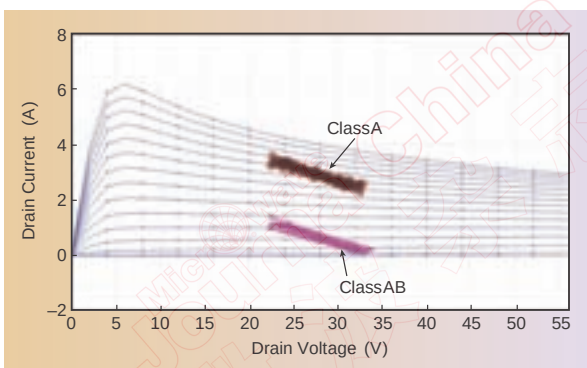


图 6. Psat 时的 I-V 曲线和 A 和 AB 类的 DLL。

专业高频微波基板制造商

中英高频微波基板 ZYFxxxD/ZYFxxxCA

产品特性

- Dk:2.14~2.65(ZYFXXXD);
2.55~3.50(ZYFXXXCA)
- 低损耗
- 执行标准IPC-4103
- 较低的Z-axis CTE, 有助于金属化孔的信赖性
- 与同类型产品相比有明显价格优势
- 安定的尺寸稳定性
- Lead free, 满足RoHS要求
- 快速批量交货

应用领域

- 军事雷达
- 基站天线
- 无源器件
- 数字广播天线
- 电子狗
- 航天
- 卫星电视
- GPS,北斗

地址: 中国江苏省常州市钟楼区
飞龙西路28号

电话: (+86-519)83253355

传真: (+86-519) 83253350

邮箱: pcb@czzyst.cn;

sd@czzyst.cn;

sd08@czzyst.cn

www.czzyst.cn



图 10. 50W,0.5-2.5GHz 的功率放大器。

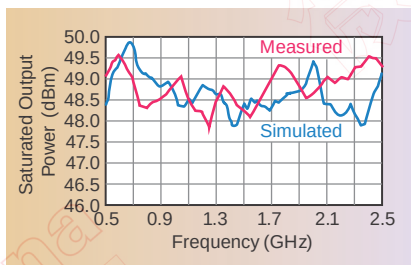


图 11. 组装放大器的饱和输出功率测量和仿真结果。

这种驱动原理图被输入到 Microwave Office 中, 两个晶体管的 S 参数被 Cree GaN 晶体管的非线性模型和 GaAs HFET 的线性模型所代替。电压和电流表放在固有发生器中, 在 GaAs 晶体管输出端有一个 M 检测器。非线性模型被用来仿真 I-V 曲线和 GaN 晶体管的 DLL (图 8)。图中左下角示出的是边界条件, 它定义了 GaAs 晶体管的预剪切最大电压和电流波动。DLL 显示在这些边界条件中。

这些负载线采用 HB 仿真器和晶体管的线性模型来进行了仿真。输入功率电平进行了选择和调谐, 从而 GaAs 晶体管的 DLL 达到硬剪辑

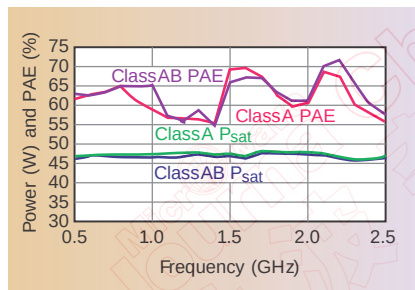


图 7. A 和 AB 类的 Psat 和 PAE 仿真。

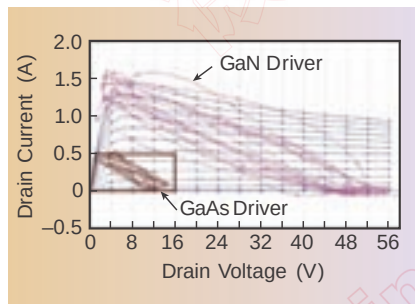


图 8. I-V 曲线以及 GaN 和 GaAs 驱动级的 DLL。

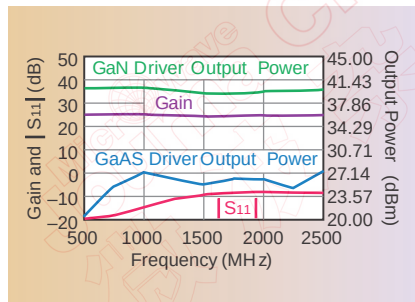


图 9. 仿真的输出功率、驱动器的功率增益和输入回波损耗以及 GaAs 晶体管的输出功率。

水平。图 8 表明, 当 GaN 晶体管已处于深度压缩后, GaAs 晶体管开始进行压缩。预剪切输出功率一般比 P1dB 低 0.5~1dB。这表明, GaAs 有足够功率来驱动 GaN。GaAs 晶体管的线性模型是从 MultiMatch 中一个特殊设备的 S 参数提出出来的。也可以在 Microwave Office 中完成这项工作。对 GaAs 晶体管来说, 只可获得 S 参数, 用它们来提取线性模型后, HB 仿真被用来仿真和预测预剪切的 A 类最大输出功率。图 9 示出了仿真的驱动输出功率、功率增益、输入回波损耗以及 GaAs 晶体管的输出功率, 通过 M 检测器来进行测量。

当它用来为多单元晶体管的每个单元提供合适负载, 或当多个晶体管以并联方式联接时 (这在 MMIC 功率放大器中很典型) 时, 这种仿真 DLL 和预剪切输出功率的方法还是非常有用的。当采用线性模型时, 对正确 DLL 的优化要快许多。因为网络一般都比较复杂, 而且输入网络还需要优化以提供所需的驱动, 所以这

显得非常重要。一般来说, MMIC 设计装置可以提供线性和非线性模型。通过采用线性模型来优化初始电路, 并采用非线性模型来检查结果, 毫无疑问, 这可以提供更快、更好、更精确的设计方法。采用晶体管的非线性模型, 最大输出功率用的优化负载线还可以相对较快地进行优化(如果仿真用的输入功率比较低的话)。

毫无疑问, 采用线性模型进行的 DLL 的 HB 仿真方法可以提取 A 类和 AB 类放大器最大输出功率的最佳负载阻抗。该方法采用一个线性晶体管模型(由可调功率源驱动)、一个阻抗调节器(输出端)和一个伽玛检测器, 调节器的阻抗置于史密斯图表中。

这种功率放大器已经制作完成(图 10)和进行了测试。测量和仿真的饱和输出功率如图 11 所示。

在两种情况下, 输出平均大约为 48.5 dBm。测量和仿真的大信号增益也类似, 一般为 52~54 dB(频率范围 500MHz~2.5GHz)。

结语

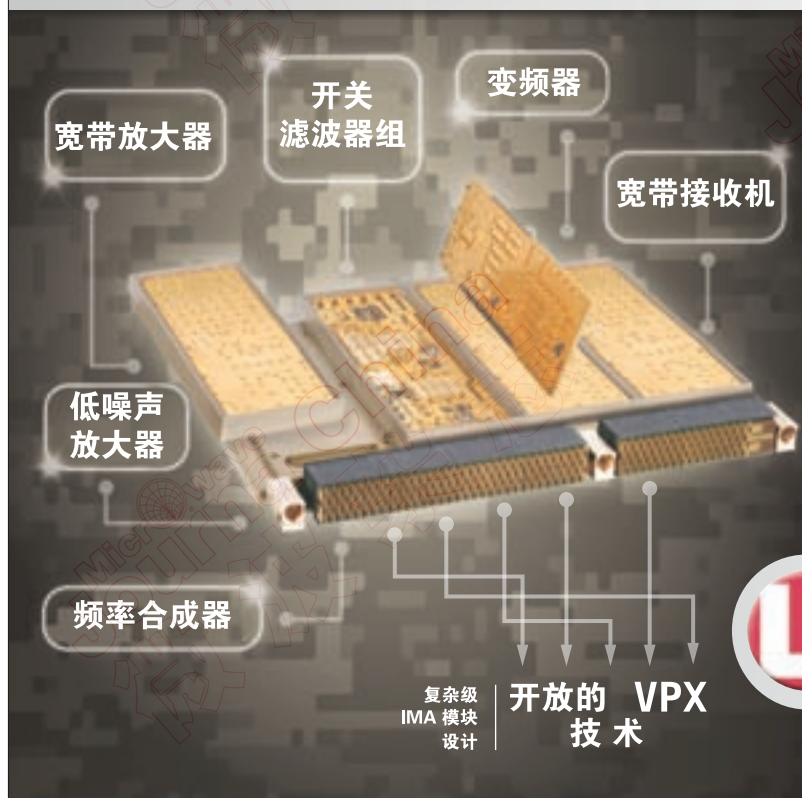
本文描述了一种采用 HB 仿真来设计和仿真最大功率放大器的方法(此时只能获得晶体管 S 参数数据)。从低噪声到大功率放大器, 从窄带到多倍频程, 这一方法应用广泛。在任何时候, 当非线性晶体管模型不存在, 设计人员必须知道和设计放大器所要发送的功率时, 它都可以采用。当非线性模型存在的情况下, 它也非常有用。

Pieter Abrie 的功率参数方法快速而且通用, 但它仅存在于 MultiMatch 放大器设计向导中。如果功率参数方法能够做到通用的仿真器中, 它将会

是对这一方法的有益补充, 而且, 总的来说, 将会显著提升射频/微波放大器设计水平。例如, 在许多情况下, 提取完整负载拉移数据和轮廓外形图将会变为接近即时。人们期望将功率参数方法做到通用仿真器中, 但 MultiMatch 合成技术和方法还是需要的。这些是仅出现在商业软件产品中的实际频率和现实世界合成的技术。如果能够将它们做到通用仿真器中, 匹配网络的设计将会更有创造性, 而其生产能力将会空前扩大。

Cree 的非线性模型可以提供固有发生器的电压和电流, 这可更深入地了解这些方法。由 Modelithics 研制的 Qorvo GaN 晶体管非线性模型也能做到这些。射频/微波晶体管线性和非线性模型领域的其它开发商也有望将具备这种能力。■(朱宝明 译)

L-3 NARDA-MITEQ公司...下一代 集成微波组件供应商



具有开放VPX技术的集成微波 组件供应商

L-3 Narda-MITEQ在微波和射频领域拥有60多年的微波组件级的技术创新, 提供高性能产品及封装解决方案。公司是具备开放VPX技术复杂级别IMA模块设计产品的可靠供应商, 产品覆盖天线接口模块, 变频器, 宽带放大器, 接收机, 频率合成器, 开关滤波器组等。

提供从产品设计到生产制造的一站式服务, 满足您具有挑战性产品的技术要求。如果需要高度专业化集成微波组件, L-3-NARDA-MITEQ - 可为您提供高级VPX解决方案的优秀资源。

更多信息, 请访问网站: nardamiteq.com
或拨打电话: (631) 231-1700。



Narda-MITEQ

[f](https://www.facebook.com/L3com) [in](https://www.linkedin.com/company/L3com) L-3com.com