深入理解放大器设计过程中的谐波阻抗匹配相关问题

Understanding the Relevance of Harmonic Impedance Matching in Amplifier Design

作者：Steve Dudkiewicz, Marc Schulze Tenberge，Giampiero Esposito Maury 微波公司
Travis Barbieri Freescale 半导体公司

现代民用和军事通信系统对功率、效率、线性度以及工作带宽提出了更高的要求，因此在设计系统的内部组件时比如低噪放和功率放大器时必须考虑更多的因素以达到最大的系统性能。

目前功放设计工程师大量的研究集中在如何通过匹配某个或者某几个谐波点频阻抗来实现更高的效率。同样研究人员也花了大量的精力去开发一套相应的研发商业测量系统，也就是谐波负载牵引系统，去辅助实现基波和谐波阻抗匹配以达到评估晶体管最佳性能给放大器设计提供设计依据的目的。

在投入到一个设计项目之前，有必要搞清楚几个问题：实际应用是否需要一个谐波匹配的放大器？如果需要，什么样的系统可以帮助设计人员达到这个目标？本文从各种不同种类的放大器原理入手进一步深入了解到什么样的放大器可以利用谐波匹配，什么样的不需要，最后本文还比较了各种谐波负载牵引技术的区别和优劣。

谐波阻抗匹配以及其在放大器设计中的应用

放大器在不同的应用场合有不同的种类，有高度线性的低噪声放大器，有工作在 A 类的线性功率放大器，也有工作在 E,F,G,J 类的非线性功率放大器。某些场合下使用未匹配的晶体管来设计。有些放大器是使用部分匹配（预匹配或者是谐波抑制），甚至是完全匹配的晶体管来设计。设计的目标和晶体管的类型决定了谐波阻抗匹配的必要性。

工作在线性条件下的放大器不会在谐波频率产生功率或者很低几乎可以忽略，而它的基波输出功率和输入功率是成线性正比例的关系的。因为没有谐波功率输出，所以抑制谐波对于器件性能的提高没有作用。线性状态下我们可以采用各种基于 S 参数的数学方法，诸如共轭匹配来达到最大输出功率或者是最大增益，当然，使用基波负载牵引系统也可以得到某个指标最佳值对应的阻抗。

现代民用和军事系统需要工作在数个倍频程甚至是一个是十倍频程的带宽范围内。因此宽带功放在射频和雷达系统中起到了关键作用。放大器的基波匹配电路会非常直接地影响输出功率和增益等参数，我们需要在整个工作频率范围内的子集频点处都要得到晶体管的最佳阻抗匹配数据，再根据这些数据折衷考虑，最终选取一个匹配网络实现阻抗匹配以达到期望的宽带响应特性。在这种情况下，极有可能低频段的谐波功率（二次，三次）与中高频段的基波功率会交叠，在这种情况下，分别对

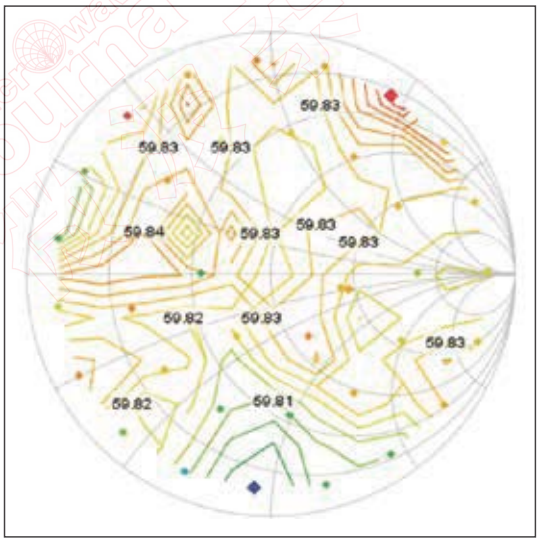

图 1. 针对一个已经谐波匹配的晶体管的基波负载牵引测试绘制出的漏极效率等高图

基波和谐波进行独立匹配的可能性大大降低。例如一个宽带放大器工作频率介于 3.1~10.6GHz 之间，理论上一个 F 类功率放大器需要在二次谐波频点如 6.2GHz 提供一个短路，而在三次谐波 9.3GHz 提供一个开路，但是 6.2GHz~9.3GHz 同时又是宽带放大器的基波工作频点，那么相应的短路和开路会使得放大器在这些频点的性能严重变差。

封装晶体管在市场上很常见，有很多的厂家供应。它们有没有匹配过，也有部分匹配和完全匹配的。没有匹配过的晶体管可以通过改变频率，功率和偏置点测量获得最佳性能，而部分匹配或者是完全匹配的晶体管相对提供的灵活性要较低，因为封装组件内部的内匹配结构限制了外匹配电路改变呈现给晶体管的阻抗的能力，而且部分匹配或者完全匹配的封装晶体管通常已经根据特定的应用条件如无线基站或者手持设备等考虑了最佳的谐波匹配功能。因此在这些部分匹配或者完全匹配的封装晶体管外部再作谐波调谐是没有任何实际意义的。

图 1 展示了对飞思卡尔 F 类晶体管进行谐波负载牵引测量的结果。这个晶体管内部集成了谐波匹配电路，晶体管工作在 960MHz，V_{dd} 为 28V，静态偏置电流为 300mA，在 1dB 压缩点出的输出功率为 35W，可以看到在整个史密斯原图改变谐波阻抗对晶体管的性能有任何的改善。

谐波阻抗匹配在设计工作在饱和区的高效率放大器非常重要。在这些条件下，晶体管将展现出深度非线性特性，谐波功率随着增益压缩逐渐增加。E,F,G,J 功率放大器正是在这样的非线性工作条件下通过谐波阻抗匹配实现的。

一般而言，当增益压缩导致谐波功率增加时，可以通过将谐波功率反射回被测件的方法提高功率附加效率，通常为了达到这个反射效果需要谐波阻抗对应的反射系数模值接近 1，相位角为某个特定的值（具体数值取决于测量的参考面），当谐波阻抗的反射系数模值降低时，功率附加效率也会随之降低。

图 2 表示在 2.5GHz 时，10W 的 GaN 晶体管的谐波阻抗固定在最高效率点和最低效率点时分别进行功率扫描，从增益压缩 0dB（接近小信号线性工作区域）到 5dB（高度压缩接近饱和区）得到的曲线对比，蓝色为最低效率扫描曲线，红色为最高效率扫描曲线。可见谐波阻抗匹配对于谐波功率抑制和效率改变是具有效果的。

现代谐波负载牵引技术

谐波负载牵引技术自从 1979 年到 1990 年间最早的闭环和开环有源负载牵引技术相继问世以来已经有数十年的历史。虽然在当时它是一种前沿技术，但由于内在稳定性问题限制了其商业应用。从上个世纪九十年代一直到本世纪初，无源机械式阻抗调配器被广泛用来进行谐波阻抗调谐，它包含了集成多路复用器的并联方式和内部或外部横向级联的串联模式，这种基于无源机械式阻抗调配器的方式和其他的无源系统一样，它可达到的最大反射系数受限于阻抗调配器探子本身的调谐范围以及阻抗调配器连接到被测件之间的损耗。

为了克服纯无源系统的固有缺点以及有源技术早期的稳定性缺点，新型的开环有源负载牵引系统于本世纪初引入并应用到谐波负载牵引系统中。在所有这些技术当中，无源谐波调谐技术，开环有源谐波调谐技术，混合有源无源谐波调谐技术以及混合信号有源谐波技术都有各自的优缺点。要深入了解谐波调谐并利用好它的测量结果，需要对这些技术进行深入了解。在这篇文章中，我们深入讨论的出发点包括测量方法原理、被测件端面反射系数调谐范围、谐波控制方法、调谐精度、速度和成本。

负载牵引系统分为标量和矢量。标量系统使用功率计或者频谱仪在某

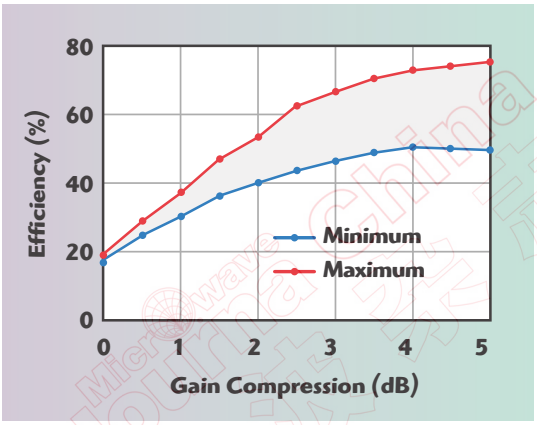

图 2. 不同谐波阻抗匹配点情况下漏极效率随增益压缩变化的曲线

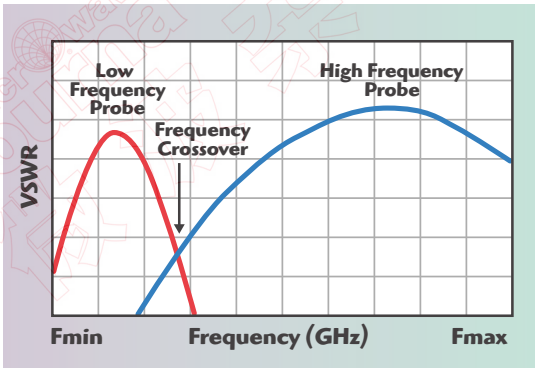

图 3. 双端口网络的 S 参数和 a,b 功率波定义

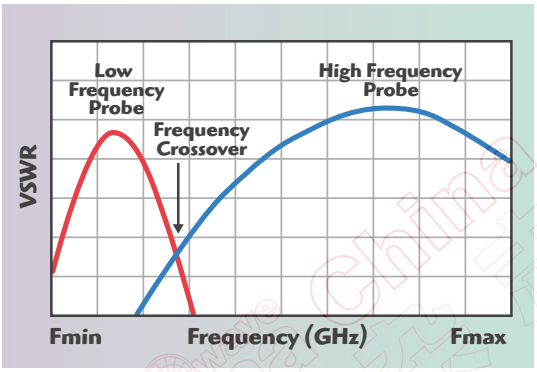

图 4. 一个无源阻抗调配器内部探子的宽带相应特性

个频点或者指定的频率标记点来测量标量数值并去嵌入到被测件端面。矢量系统使用矢量网络分析仪在被测件端面校准并在被测件端面使用矢量网络分析仪的矢量接收机对 a,b 功率波进行直接测量从而计算得到各种性能参数，它的优点是无需去嵌入。图 3 显示的一个双端口网络的 S 参数和 a,b 功率波定义。尽管无源负载牵引系统有标量和矢量之分，使用标量功率计或者矢量网络分析仪都能实现，有源负载牵引方法确只能用矢量网络分析仪的接收机来测量 a,b 波，确定提供给被测件的反射系数。

无源阻抗调配器本身是具有宽带特性的，所谓的宽带特性是指内部的调谐探子可以在大的带宽范围内实现连续的反射系数，甚至还可以实现谐波调谐。探子的相应特性如图 4 所示，可以看出一个阻抗调配器通常实际包含了两个探子，分别覆盖低频和高频部分，这样可以扩大阻抗调配器的相应带宽。一个探子可以控制某一个频点对应的阻抗，但是它却无法同时对其他频率范围包括谐波频率的阻抗进行控制。如果有 N 个探子在一个腔体内级联（所谓的多探子阻抗调配器）或者是 N 个探子分别独立在一个腔体内在外部级联（也就是多个阻抗调配器级联），那么就可以控制 N 个频点的阻抗。因此，包含两个探子的阻抗调配器可以控制两个频点的阻抗，以此类推。

传统的标量谐波负载牵引系统中就是使用这种原理，也即集成了多个探子来共同实现基波和谐波频点的阻抗控制。各个探子产生的矢量级联再减去被测件和阻抗调配器之间互联结构如线缆，探针引入的损耗，最终实现了这种系统基波和谐波的阻抗可调。在一个包含典型 50 欧姆夹具的标量谐波负载牵引系统配置中，基波 2.5GHz 的反射系数幅值通常可以达到 0.93 而二次谐波 5GHz 可以达到 0.9。在矢量接收机谐波负载牵引系统中，由于在被测件和阻抗调配器之间插入了低插损耦合器，带来的损耗降低了系统的可调谐范围，2.5GHz 降低为 0.91，而二次谐波也响应降低至 0.85。

开环有源负载牵引系统中，机械式的阻抗调配器被一个幅度相位可控的信号源替代。原本无源系统使用机械式的阻抗调配器将输出能量反射回被测件从而实现阻抗，现在有源系统是使用这个信号源来向被测件注入新的信号，从而实现同样的反射系数 Γ_L=a2/b2。

混合有源负载牵引系统使用的是一个无源阻抗调配器实现基波阻抗控制，而使用有源的方法实现谐波阻抗控制。同样的条件下基波反射系数最大幅值为 0.96 到 0.91，而二次谐波则可以大于 1。

随着频率增加，被测件和阻抗调配器之间互联结构的损耗同样也会增加，那么无源系统的调谐范围也会相应降低。反过来，一个纯有源的负载牵引系统对于基波或者谐波的反射系数没有任何限制，只要可以产生足够的注入功率满足 Γ_L=a2/b2 条件。

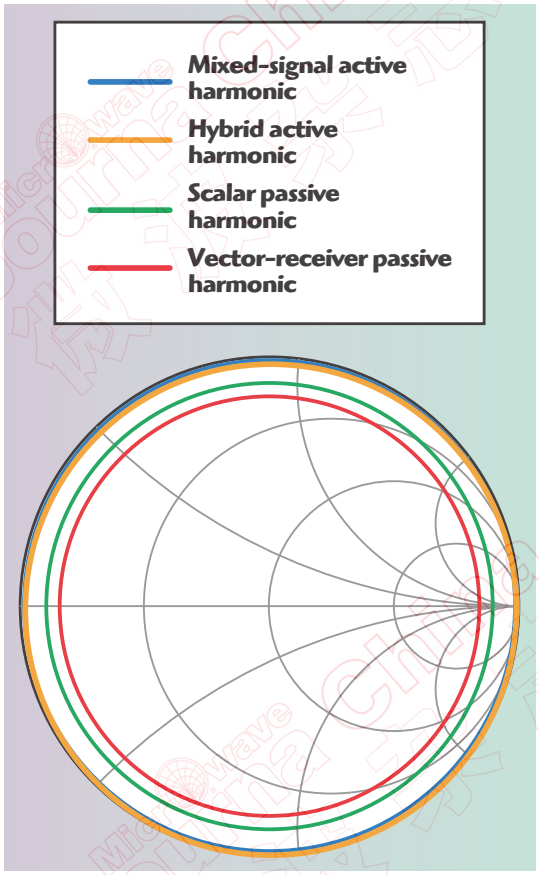

图 5. 不同的谐波负载牵引技术在谐波频点可以达到最大反射系数幅值典型值比较

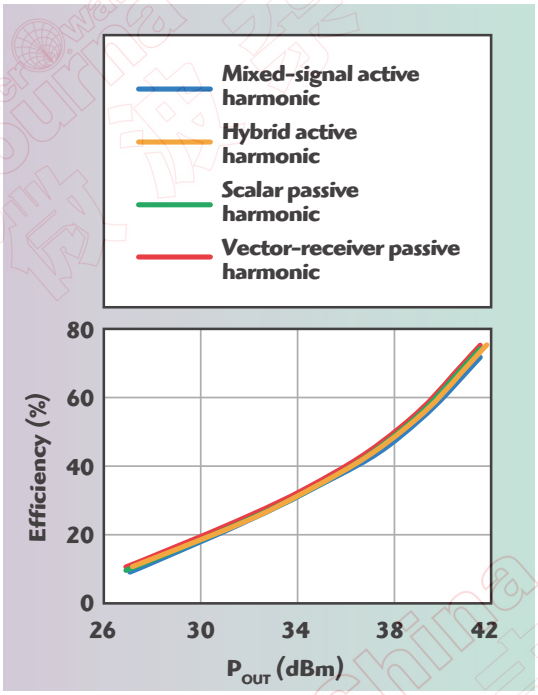

图 6. 不同的谐波负载牵引技术在同样的负载条件下得到的效率随输出功率变化的曲线对比图

图 5 比较了不同的谐波负载牵引技术在谐波频点可以达到最大反射系数幅值典型值。

有源负载牵引系统通常会直接使用同时具备矢量接收机和有源调谐信号源的网络分析仪。网络分析仪直接在被测件端面测量 a, b 功率波，负载牵引软件会计算合成反射系数 ΓL=a2/b2 条件所需要的反射注入功率再发送指令使信号源产生相应的矢量信号反注入到被测件端面，网络分析仪在被测件端面测量结果并反馈给软件。通过软件特定的迭代算法可以实时调整有源注入信号的幅度和相位直到系统收敛至初设的反射系数。在不同的阻抗点和功率点系统将重复进行这个过程完成整个测试。

另外有一种特殊的有源负载牵引系统，我们称之为混合信号有源负载牵引系统（MSALP）。与传统的有源负载牵引系统不同，它内部包含了宽带的任意波发生器加上变频模块以及宽带数据分析加下变频模块。由于 MSALP 的宽带特性，它使用时间分割方法极快速地给被测件呈现许多的阻抗点，几乎可以说是同时产生，因此无论是基波还是谐波，它的调谐速度相比而言大大提高。

介绍了这么多种方法，需要注意的是无论使用什么样的谐波调谐方法，同样频点下产生同样的阻抗针对同样的被测件我们将会得到同样的测量结果。图 6 展示了使用无源标量系统，无源矢量系统，混合有源系统和混合信号有源系统在同样的基波，二次谐波，三次谐波阻抗条件下对同一个被测件的测量结果。

最大效率通常是在负载谐波阻抗反射系数幅值最大的时候得到。负载谐波阻抗反射系数幅值为 1 可以得到更高的效率。

图 7 为一个 10W 的 GaN 晶体管在同样的增益压缩和偏置条件下，固定相位改变二次谐波阻抗反射系数的幅值对漏极效率影响的曲线。可以看见漏极效率随着谐波阻抗幅值的增加而增加，0.85 的谐波阻抗幅值（使用矢量接收机无源负载牵引系统）可以得到 75% 的漏极效率，而 0.99 的谐波阻抗幅值（使用有源负载牵引系统）可以得到 80% 的效率。

虽然不同的技术有不同的反射系数限制，但它们有各自的优缺点。总的来说，使用无源机械式阻抗调配器无法避免一个预校准的过程，预校准过程使用网络分析仪对阻抗调配器的各个机械位置对应的 S 参数进行测量并存储在一个数据文档中。使用 N 个探子就意味着预校准时间乘以 N 倍。最新使用 LXI 接口的阻抗调配器配合网络分析仪可以在 11 分钟左右之内完成单个探子共 700~1000 个机械位置的预校准，而包含有两个探子的阻抗调配器或者两个单探子的阻抗调配器级联则需要 22 分钟。

标量系统和矢量系统的校准过程也是有所区别的。标量校准包含了一个所谓的“功率校准”的过程，功率校准主要是搭建好系统连接直通后作一个功率扫描并且基于功率计的读数计算出输入链路的损耗，这个过程需要数分钟。矢量系统的校准包含了两项或者三项，也就是矢量校准，绝对功率校准和可选的相位校准（主要用来做非线性网络分析仪测量）。两个基本校准过程共需要 5 分钟左右，而包含第三个相位校准的话需要 7 分钟。

调谐时间主要取决于采用的是有源还是无源负载牵引技术以及选用的测试仪表。标量的无源负载牵引系统调谐速度主要依赖于多个探子的移动时间以及功率计的测量时间。矢量

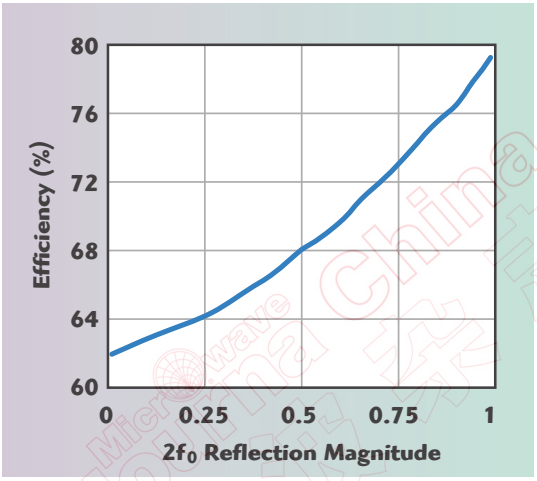

图 7. 漏极效率随二次谐波反射系数幅值变化的曲线

表 1
负载牵引测量时间比较，单位为分钟

Setup	Tuner Cal	System Cal	Step 1	Step 2	Step 3
			f_0 Load-Pull, Fixed $2f_0$ at 50 ohms (35 Loads, 16 Powers)	$2f_0$ Load-Pull, fixed f_0 at Optimized Value (20 Loads, 16 Powers)	f_0 Load-Pull, fixed $2f_0$ at Optimized Value (35 Loads, 16 Powers)
Scalar Harmonic (2 tuning elements)	22	3	11.1	6.4	11.1
Vector-Receiver Harmonic (2 tuning elements)	22	5	5.3	3.1	5.3
Hybrid-Active Harmonic (1 tuning element)	11	5	4.2	7.3	7.5
Mixed-Signal Active (0 tuning elements)	No Tuner	5	15 seconds	35 seconds	50 seconds

的无源负载牵引系统同样了会依赖多个探子的移动时间，但是因为矢量接收机替代了功率，它的测量速度比标量系统更快。传统的开环有源负载牵引测量速度可能会比无源阻抗调配器要快，也有可能要慢，主要取决于调谐的精度要求和有源阻抗收敛的迭代次数，例如 -30dB 的调谐精度要求当然要比 -50dB 的调谐精度要求速度要快。至于混合信号有源负载牵引系统 MSALP，由于它采用时间分割方法可以几乎同时给被测件呈现许多的阻抗点，它的调谐时间比所有其他的系统要快得多。

表 1 列出了不同的谐波负载牵引方法的阻抗调配器的校准时间（如果需要的话），系统校准时间，固定二次谐波阻抗为 50 欧姆调谐基波阻抗并进行功率扫描需要的时间，固定基波阻抗调谐二次谐波阻抗并进行功率扫描需要的时间以及固定二次谐波阻抗为最优值调谐基波阻抗并进行功率扫描需要的时间。这次对比中使用了 Maury 公司 MT982ML01 LXI 认证的谐波阻抗调配器，矢量接收机方法使用的是 Keysight 公司的 N5242A PNA-X 网络分析仪，有源调谐时使用的 N5242A 内部的第二个信号源以及外部功率放大器，软件使用的是 MT930 系列测量和器件建模软件套装 IVCAD，混合信号有源负载牵引系统使用的 Maury 公司的 MT2000。

结论

在启动一个耗时耗力的放大器设计项目之前提前规划以及理解设计目标及限制条件非常重要。设计放大器需要弄明白目标是设计一个小信号线性放大器，一个窄带高效放大器还是宽带放大器，以及使用的晶体管是未匹配，部分匹配还是完全匹配的封装晶体管。只有清晰定义好设计目标才可能决定设计是否需要谐波负载牵引系统的谐波调谐数据以及是否能充分利用这些数据以避免浪费过多的时间在没有意义的工作上。如果需要进行谐波调谐，也需要考虑使用什么样的方法和技术才能真正实现所需要的反射系数，使用什么样的设备以及规划好测量所需要的时间以及测量过程涉及到的附件。■