

# 测试射频功率放大器设计

研发-表征-生产

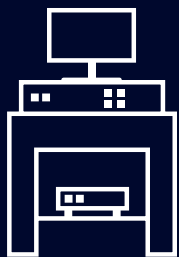
eGuide | Version 01.00

**ROHDE & SCHWARZ**

Make ideas real



# 开发射频功率放大器通常涉及三个阶段： 研发(R&D)、表征和生产。



## 研发

- R&D的第一步通常是设计模拟和仿真。优化设计通常在首批器件上将仿真和测量辅助方法相结合。这要求在整个设计流程中满足严格的射频性能要求。

## 表征

- 研发出硬件之后,接下来需要表征设计。这需要使用非常准确和灵活的测试解决方案,同时还需要保证快速测量,因为需要在所有操作条件下验证小批量器件。

## 生产

- 在生产阶段,器件需要符合所有规格要求,才能交付给客户。

本电子指南阐释了常规测量,并展示了罗德与施瓦茨的测试工具在所有三个阶段可为工程师提供的支持与帮助。

# 目录

## 研发

▶ 第4页

## 可靠的模拟和优化工具

▶ 第4页

## 关键性能指标

▶ 第5页

## 压缩点和功率附加效率

▶ 第6页

## 互调

▶ 第7页

## 互调截止点和谐波

▶ 第8页

## 噪声系数/噪声因子

▶ 第9页

## 晶圆验证和器件建模

▶ 第11页

## 负载牵引测量

▶ 第12页

## 器件建模

▶ 第13页

## 为什么进行调制测量？

▶ 第14页

## 推导EVM

▶ 第15页

## 失真

▶ 第17页

## 优化选项

▶ 第18页

## 使用不同的放大器拓扑

▶ 第19页

## 包络跟踪

▶ 第20页

## Doherty放大器

▶ 第21页

## 数字Doherty放大器

▶ 第22页

## 传统和数字Doherty操作

▶ 第23页

## 负载调制平衡放大器(LMBA)

▶ 第24页

## 线性化

▶ 第25页

## 借助数字预失真进行优化

▶ 第26页

## 预失真示例

▶ 第27页

## 表征

▶ 第30页

## 生产

▶ 第32页

## 经过优化的生产线调制测试

▶ 第32页

## 结语

▶ 第34页

## 缩写

▶ 第35页



# 研发

## 使用电子设计自动化(EDA)工具的设计流程

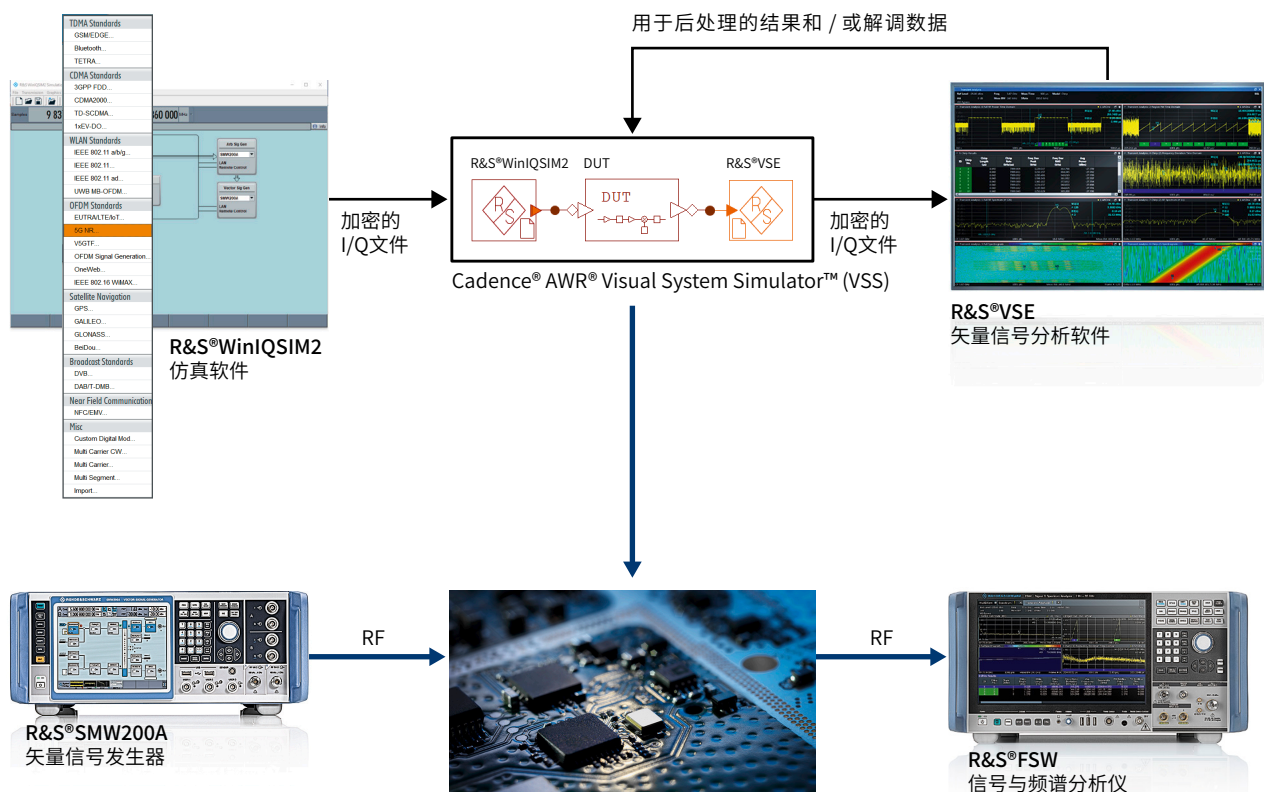
### 可靠的模拟和优化工具

R&S®WinIQSIM2模拟软件可以生成符合从5G到Wi-Fi®等多种数字标准的信号。这些信号可以传输到Cadence®AWR® Visual System Simulator™ (VSS)。

VSS提供预先配置的测试平台,便于设计人员根据峰均功率比(PAPR)、邻道泄漏比(ACLR)和许多其他放大器关键性能指标来模拟和优化射频前端器件(例如功率放大器)的性能。开发人员也能够确定产生杂散成分和引起其他系统缺陷的根源。设计人员可以通过系统级负载牵引分析为无线通信系统中使用的线性功率放大器优化阻抗匹配网络。

信号经过模拟电路被传输到R&S®VSE矢量信号分析软件,这款基于电脑的信号分析软件工具会检测信号的调制性能和误差矢量幅度(EVM)。测试布局如图1所示。

图1:与首批样品的硬件测量相比,使用Cadence VSS软件进行设计和仿真的设计流程



Cadence、Cadence徽标和www.cadence.com/go/trademarks网站中的其他Cadence标志是Cadence Design Systems, Inc.的商标或注册商标。所有其他商标为其各自所有者拥有。



# 研发

## 使用连续波信号的设备验证

### 关键性能指标

生产出首批硬件样品之后，需要测量样品的多种特性。为了简化测试流程，最好使用一种工具尽可能测量多种特性。图2所示的R&S®ZNA矢量网络分析仪(VNA)就是一款这样的工具，单台仪表即可验证频率范围、功耗、放大特性和噪声系数等所有特性。

VNA能够测量各种各样的特性：

- ▶ 频率范围
- ▶ 增益、增益压缩、幅度失真(AM/AM)、压缩点和饱和功率
- ▶ 相位失真(AM/PM)
- ▶ 功耗
- ▶ 效率、功率附加效率(PAE)
- ▶ 阻抗匹配
- ▶ 小信号和脉冲S参数
- ▶ 噪声系数
- ▶ 谐波、互调、互调截止点

图2: R&S®ZNA矢量网络分析仪



# 研发

## 使用连续波信号的设备验证

### 压缩点和功率附加效率

研发过程需要评估多种重要特性，例如所覆盖频率范围内的压缩点和功率附加效率 (PAE)。了解最大输出功率和有用功率范围很重要，因为最大输出功率已趋于饱和，存在非常明显的非线性效应。通常，研发人员会检测1 dB或3 dB压缩点，确定放大器在出现信号压缩之前的线性化程度。根据应用情况，可以测量任一压缩点。

图3: 压缩点和增益测量

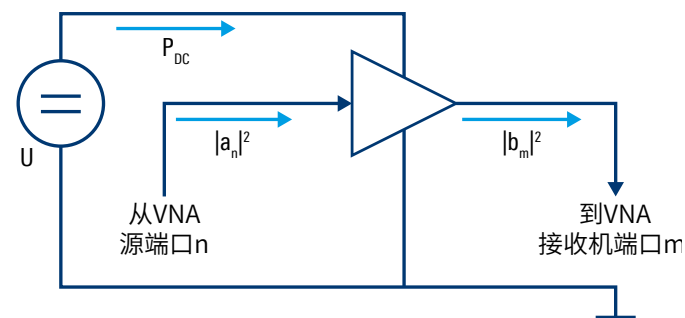


图3显示使用1 dB压缩点作为阈值。VNA能够扫描输入功率并测量输出功率，轻松完成压缩点测量。

测量电源到测试器件的功耗，可以评估效率。相对于电源提供给放大器的功率评估输出功率**b**和输入信号**a**的关系，即称作PAE。图4显示了这种关系。

图4: 功率附加效率分析

$$PAE = \frac{|b_m|^2 - |a_n|^2}{P_{DC}}$$



# 研发

## 使用连续波信号的设备验证

### 互调

互调也是一个重要的放大器特性。放大器的非线性度会引起互调。如图5所示，互调测试通常会使用双音信号，并在频率范围内扫描信号。

另一种测试方式如图6所示，保持一个信号音不动，将另一个信号音左右移动，改变二者之间的偏差或可调间距。

第三种测试方式如图7所示，将信号音在频率范围的位置保持不动，并且一个信号音的功率电平不变，同时改变另一个信号音的功率电平大小，确定非线性度在整个调制过程中的影响。

借助VNA的专用程序能够快速完成这三种测试，从而了解以线性方式处理调制的能力。

VNA需要生成双音信号，理想情况下可以配备诸如R&S®ZNA的内部合路器以提供合路信号，这样不必使用可能需要进行额外校准的外部合路器。

图5: 以固定间隔在频率范围内进行扫描

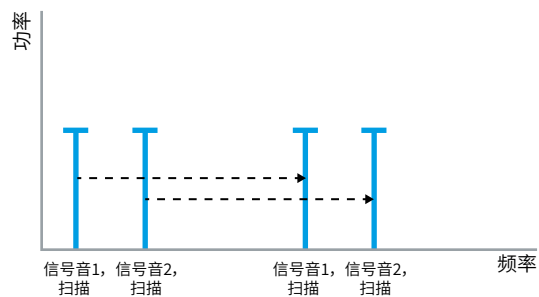


图6: 以可调偏差扫描信号音2

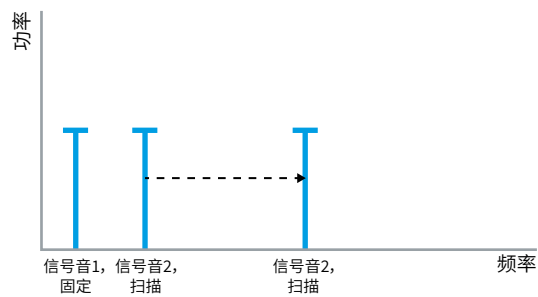
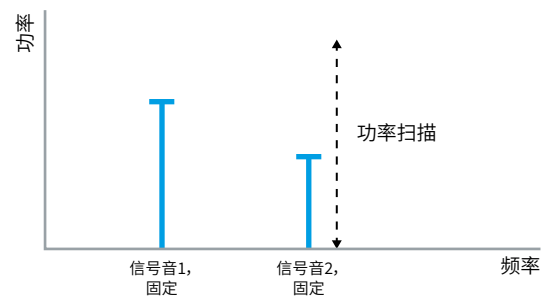


图7: 使用不同功率比的互调测试





# 研发

## 使用连续波信号的设备验证

### 互调截止点和谐波

互调截止点测量对于了解放大器的线性度也非常重要。该截止点通常被称为三阶互调截止点(IP3)。这是通过数学运算来近似对比线性行为和三阶谐波的增加速度。如图8所示,蓝色曲线代表有用的增益转移,红色曲线表示三阶谐波随着输入功率提高而增加的情况,这两条曲线的交点即为理论上的互调截止点。该截止点越远,表示放大器的特性越佳。

将连续波信号输入功率放大器并测量输出信号,可以测量谐波。

VNA可以轻松完成这种测量:由于谐波的频率可能是原始输入频率 $f_0$ 的两倍、三倍、四倍不等,因此可以使用VNA的变频测量功能(见图9)。VNA的频谱分析仪模式提供完整的频谱视图,还可以检测其他杂散信号。

图8:三阶互调截止点

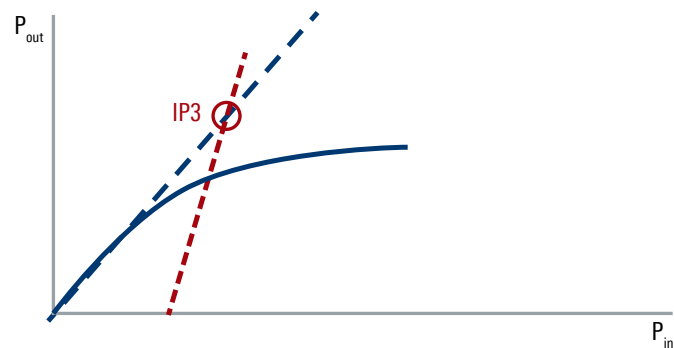
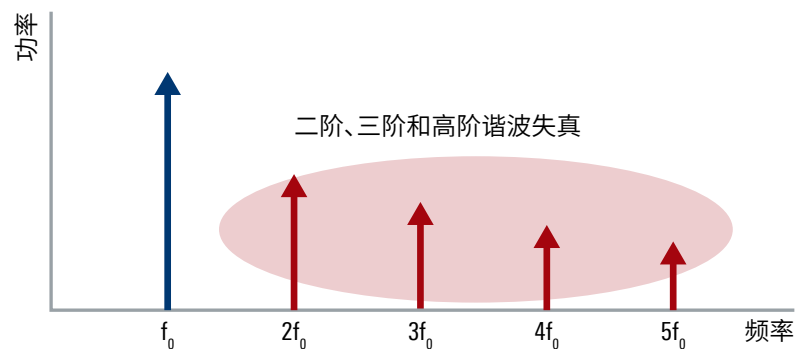


图9:功率放大器的非线性度特性引起的谐波失真



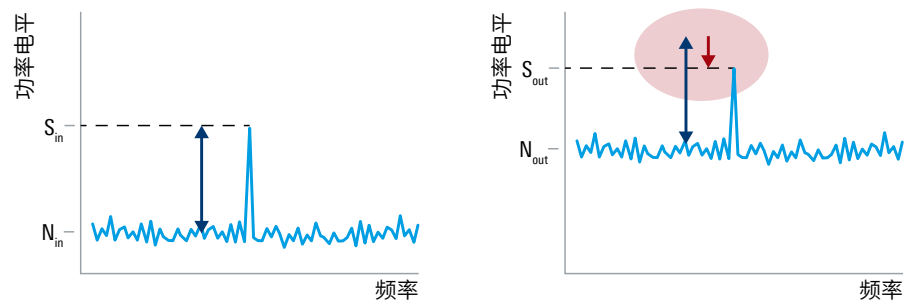
# 研发

## 使用连续波信号的设备验证

### 噪声系数/噪声因子

对于一些放大器应用, 噪声系数是一个重要特性, 也被称为噪声因子。噪声系数大体上描述放大器自身产生的噪声。图10展示了一个示例。

图10: 放大器产生的噪声降低了放大器输出的信噪比

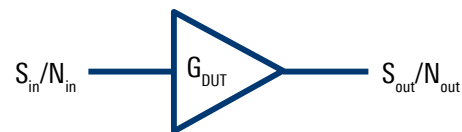


左侧是一个具有一定信号强度的输入信号( $S_{in}$ ), 信号中出现了背景噪声( $N_{in}$ )。该信号经过放大器的时候, 所有信号都会通过放大器增益被放大, 包括有用信号和频带白噪声。

问题在于, 放大器本身也会产生一些白噪声。这会降低动态范围和信噪比(SNR)。在图10的右侧, SNR相对于输入信号有所降低。深蓝色箭头表示原始SNR, 红色箭头表示SNR的降低幅度。放大器应尽可能减少所产生的噪声, 接收机中使用的低噪声放大器更需如此。

为了测量噪声系数, 可以根据放大器的增益( $G_{DUT}$ )对比输出噪声( $N_{out}$ )和输入噪声( $N_{in}$ ) (见图11)。

图11: 输出噪声和输入噪声对比



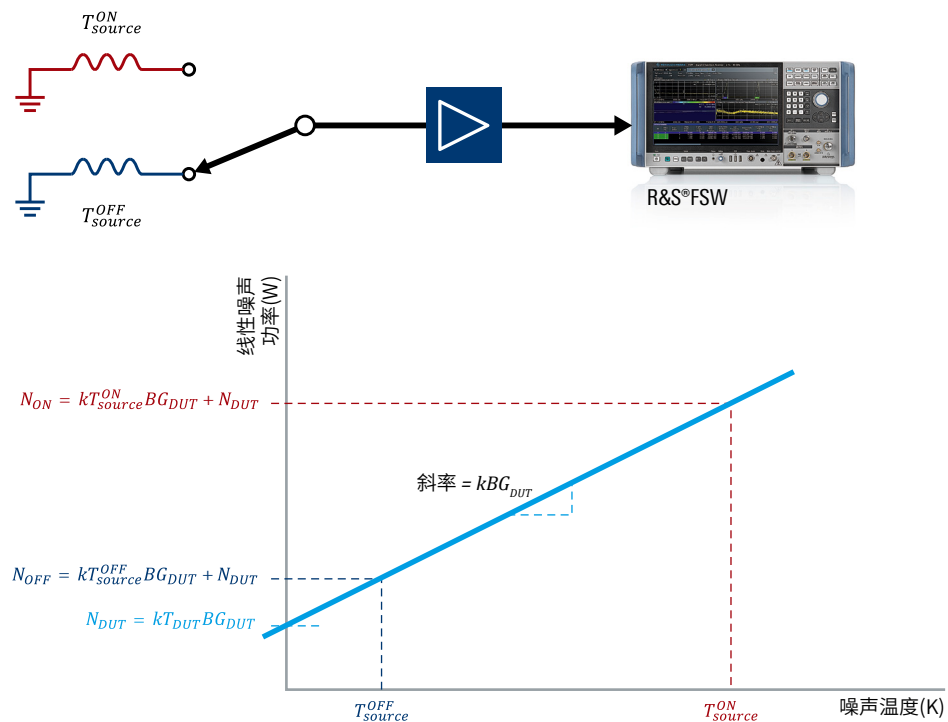
# 研发

## 使用连续波信号的设备验证

有两种方法可以测量噪声系数。一种是Y因子法，这种方法一般使用频谱分析仪(见图12)。这种方法在输入噪声的时候测量器件中的噪声。这种方法会在噪声源开启和关闭时分别测量噪声。

对这两种测量的结果进行连线，即可得到放大器产生的噪声 $N_{DUT}$ 。

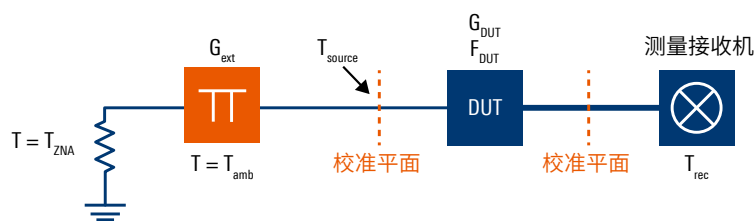
图12:用于测量噪声因子的Y因子法



第二种方法被称为冷源方法，如图13所示。这种方法使用VNA作为源，并使用测量接收机，会在源关闭时测量噪声，在源开启时测量增益。

这种计算方法基于噪声温度的表示方法。这种方法不检测每个器件产生的噪声，而是检查代表噪声影响的噪声温度。

图13:用于测量噪声因子(F)的冷源方法



$$F_{DUT} = \frac{N_{DUT,meas} - T_{rec}}{G_{DUT}T_0} - \frac{T_{source} - T_0}{T_0}$$

### 图例:

- $T_{amb}$  环境温度
- $T_{source}$  噪声源的噪声温度
- $T_{source}^{ON}$  噪声源开启时的噪声温度
- $T_{source}^{OFF}$  噪声源关闭时的噪声温度
- $T_{rec}$  接收机的噪声温度
- $T_0$  IEEE规定的标准参考温度:290 K (16.85°C)
- $B$  系统带宽
- $k$  玻耳兹曼常数( $1.38 \times 10^{-23}$  J/K)
- $G_{DUT}$  DUT增益
- $F_{DUT}$  DUT噪声因子(线性)



# 研发

## 使用连续波信号的设备验证

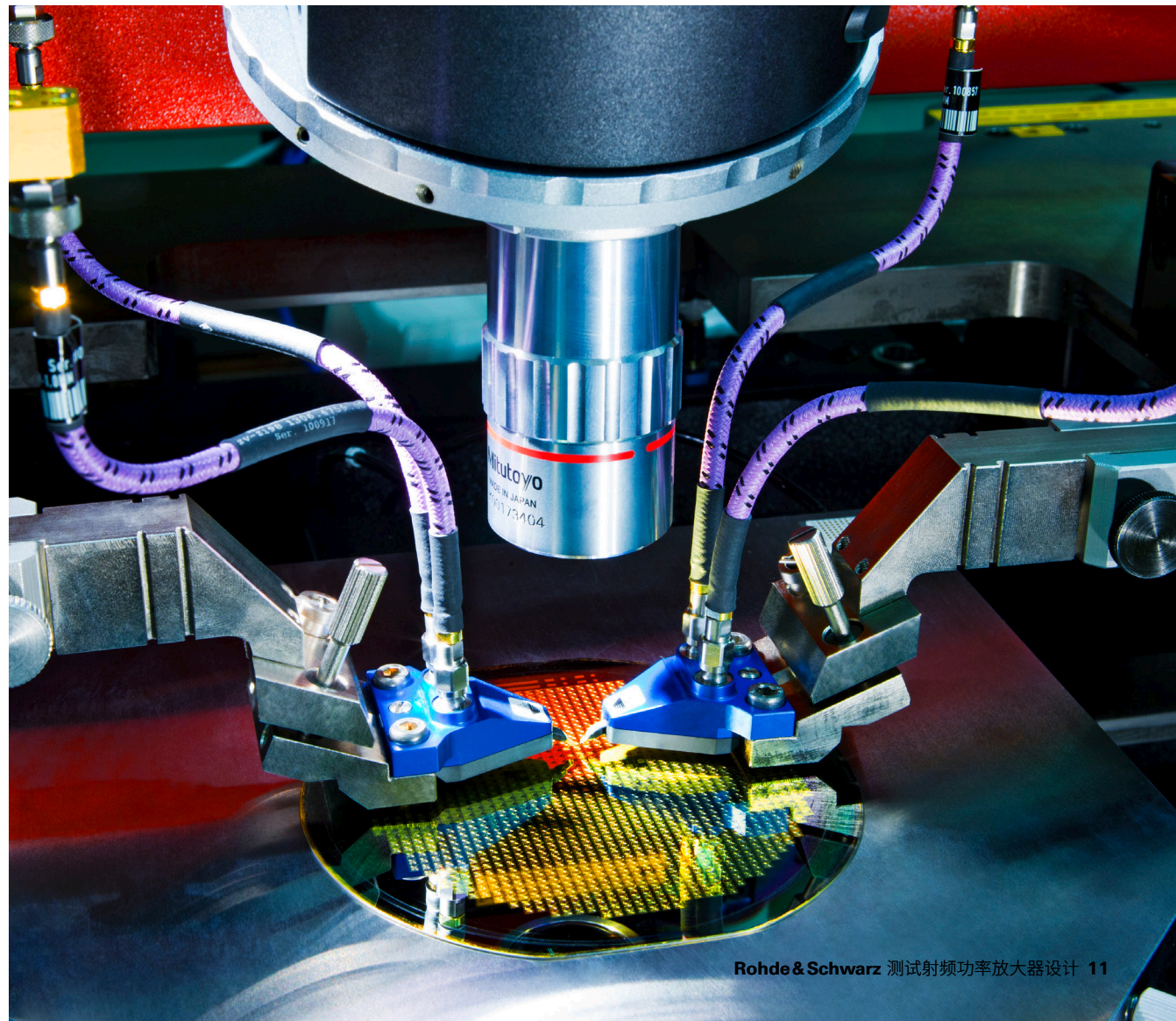
### 晶圆验证和器件建模

晶圆测试和晶圆验证的首要任务是了解晶圆是否成功运行。这通常可以通过测试直流参数和其他基础射频参数来完成。

在功率放大器上进行射频测量时，放大器会逐渐发热。因此，在测量过程中不需要关注标准S参数，还需关注脉冲S参数，以便限制放大器的自发热情况。另外，晶圆上器件的周围通常没有匹配网络。因此，需要使用负载牵引方法在输入和输出施加特定阻抗。

为了连接到晶圆以进行测量，罗德与施瓦茨和晶圆探测领域的领先公司MPI Corporation与FormFactor携手合作(见图14)。

图14: 通过探测进行晶圆验证



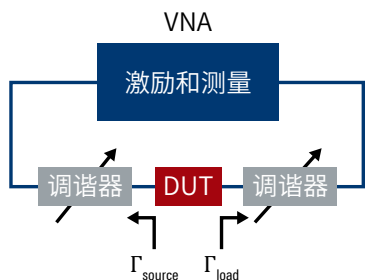
# 研发

## 使用连续波信号的设备验证

### 负载牵引测量

如前所述, 被测设备(DUT)的周围需要有匹配网络。负载牵引方法可以增加基础测试中所需的阻抗转换(见图15)。

图15: 负载牵引阻抗控制以测量DUT在不同匹配条件下的非线性行为

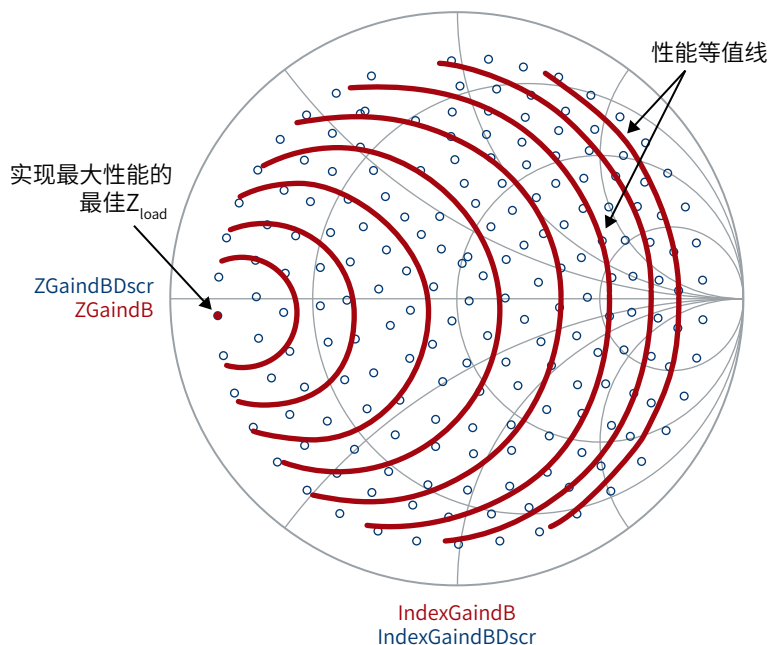


无源或有源负载牵引方法均可。完整的器件表征需要利用负载牵引方法, 因为作为放大器的核心器件, 晶体管在很大程度上取决于其负载阻抗。源和负载牵引会在DUT的输入和输出施加不同的阻抗。

功率放大器通常在开始压缩信号的非线性范围内使用, 因为放大器在此范围内能够提供最大输出功率和最佳效率。但是, 由于非线性影响, 无法在此范围内对功率放大器进行有效的小信号测量。

放大器在此范围内的行为发生变化, 不过仍然可以继续使用VNA测量矢量波量来测定放大器的性能和特性。利用负载牵引方法, 可以根据在DUT的输入和输出施加的阻抗得出最佳工作条件。相应情况显示在史密斯圆图中(见图16)。

图16: 在显示负载阻抗的史密斯圆图上绘制DUT的电气参数



# 研发

## 使用连续波信号的设备验证

### 器件建模

在更大的操作环境中模拟功率放大器的时候，需要使用合适的放大器模型。有两种方法可以建模：

#### 方法1

这是一种简化的建模方法，能够测量小信号的影响和放大器的线性行为。

这种方法利用特定的电容和电阻效应来创建模型，例如图17所示的场效应晶体管(FET)简化模型。

#### 方法2

这种方法被称为行为模型或黑盒方法(见图18)。这种方法只关注从输入到输出的传递函数，不考虑晶体管内部的不同效应。

这种方法还会考虑谐波和不同的阻抗影响。通常会使用测量波量的非线性VNA来测量这些特性。这种方法适合测量DUT的线性和非线性行为。

图17:代表晶体管等效电路的FET简化模型

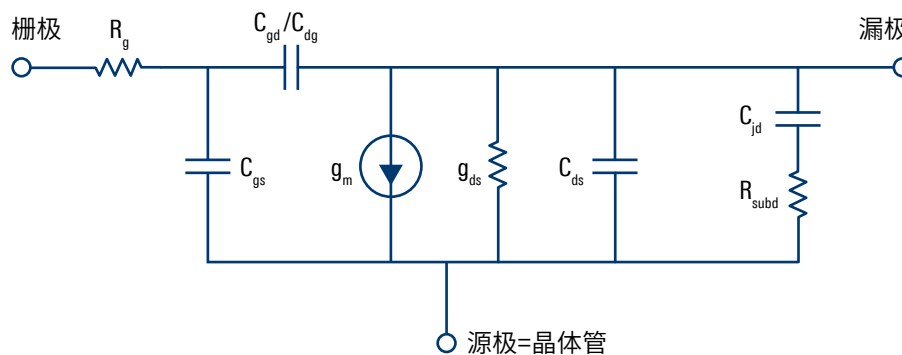
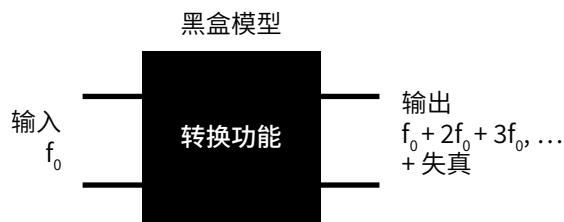


图18:黑盒模型方法考虑谐波和不同的阻抗影响





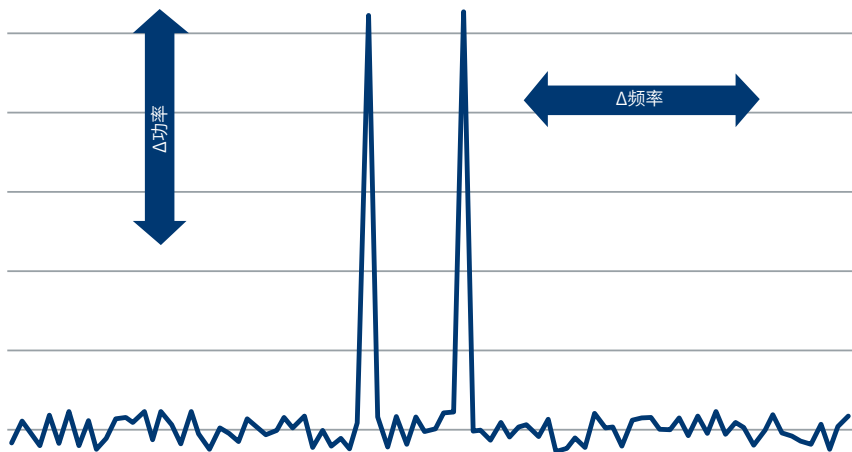
# 研发

## 通过调制测量进行器件验证

### 为什么进行调制测量？

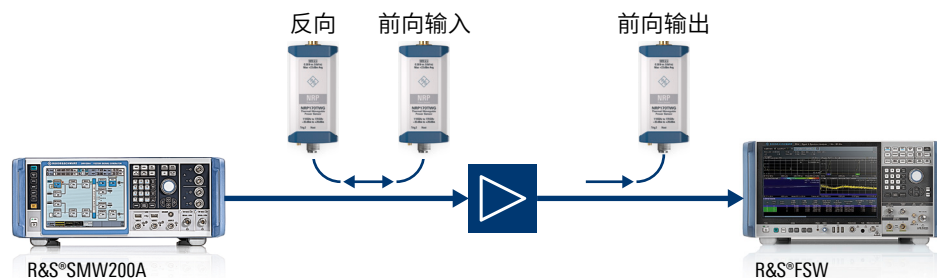
传统方法使用VNA进行连续波测量，能够获得关于器件及其特性的许多信息（见图19）。但是，目前5G或最新的Wi-Fi®新增标准采用超宽带调制方案，带宽可能高达数百兆赫。仅凭连续波测试，无法轻松验证放大器的行为。

图19:传统方法使用VNA进行连续波测量



理想情况下，应在存在目标信号波形的目标场景中验证器件行为。相应的测试装置一般如图20所示。测试使用矢量信号发生器将宽带调制信号馈入器件，频谱分析仪连接器件的另一端，然后解调信号，从而了解器件在实际目标条件下的特性。测试通常还会使用功率探头，以便获得准确的增益和匹配信息。

图20:测试装置使用目标信号波形分析器件行为



测试装置可以测量：

- ▶ 通道功率、增益和输入匹配
- ▶ 邻道泄漏比(ACLR)/邻道功率(ACP)
- ▶ 调制性能:EVM
- ▶ 失真:AM/AM和AM/PM

邻道泄漏比(ACLR)测量能够确定通道功率和邻道功率(ACP)。放大器会使相邻通道中出现频谱再生，因此测量放大器对邻道功率的贡献非常重要。

EVM描述宽带调制信号被放大的线性化程度，确保目标应用具有低误码率和高数据吞吐量。

# 研发

## 通过调制测量进行器件验证

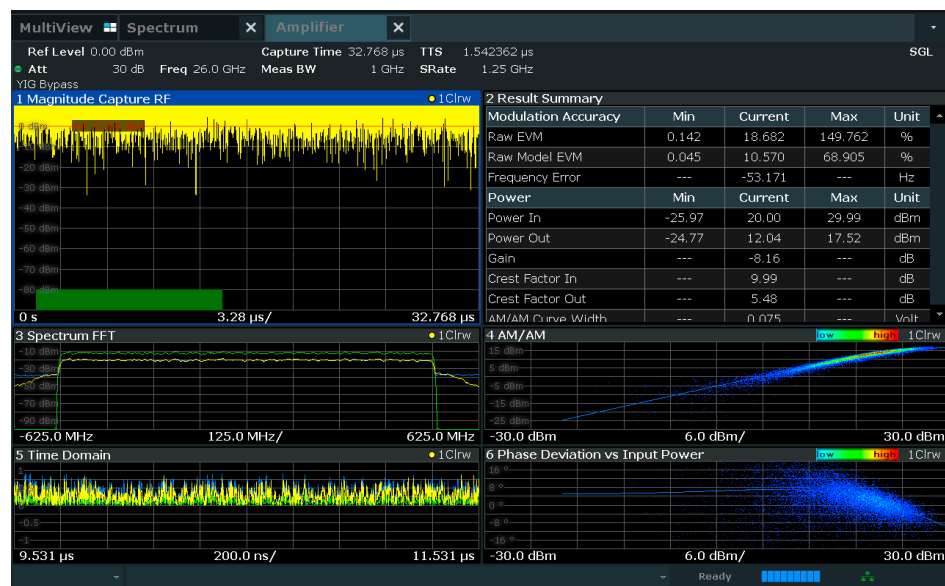
### 推导EVM

有两种方法可以推导EVM。

#### 方法1

RMS EVM也被称为原始EVM,会以采样点为单位检测输出信号和输入信号之差(见图21)。

图21:使用RMS方法推导EVM

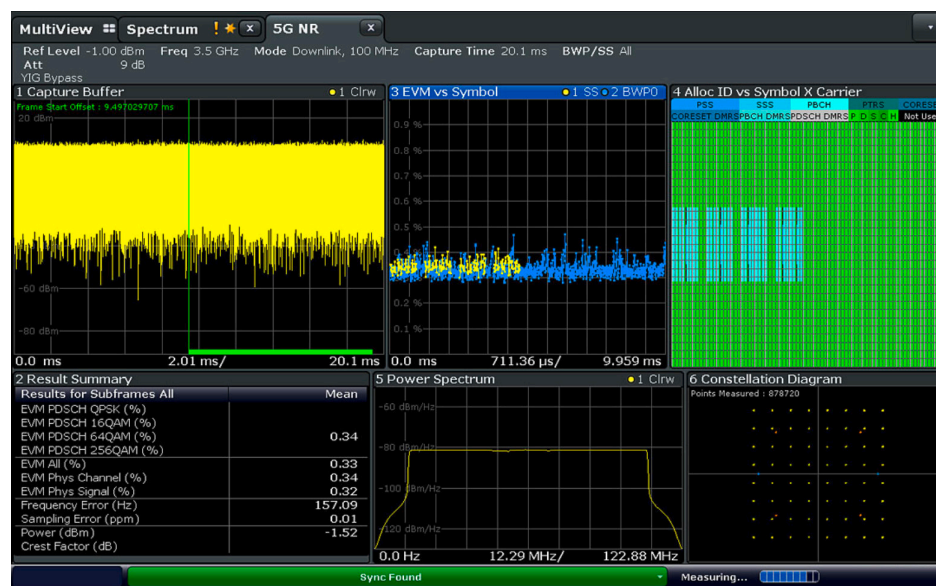


这种测量非常快速,无论误差矢量多大,都能够非常有效、正确地计算出最差的EVM。但是,这种方法需要使用原始的输入I/Q数据。

#### 方法2

另一种方法是解调EVM,遵循基于5G或Wi-Fi®等标准的解调流程(见图22)。这种方法知晓调制类型,无需使用基准I/Q文件作为参考。这种方法会将接收的采样点和相距最近的星座点进行对比。

图22:解调EVM方法



解调方法的优点在于,多种标准明确规定了这种方法。例如,标准指定了测量方法和使用的滤波类型等。这样能够对比不同的应用场景和不同供应商。

# 研发

## 通过调制测量进行器件验证

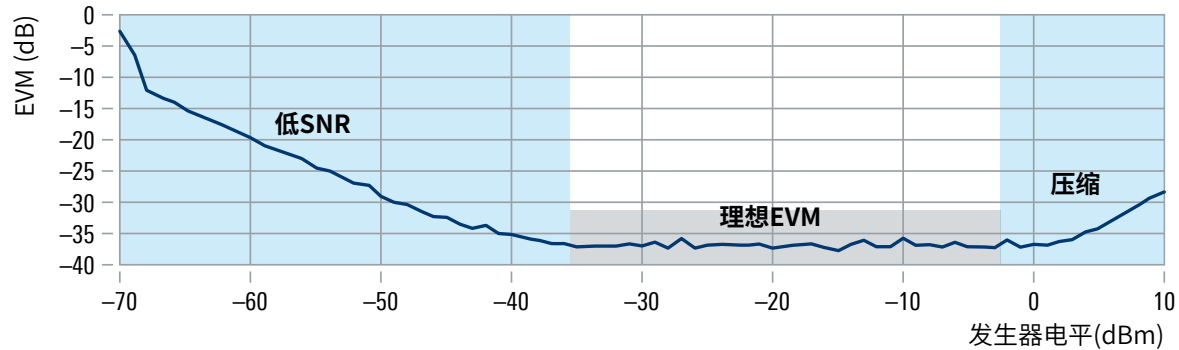
但是,为了充分表征器件,不同输入和输出电平下的EVM并不相同。EVM与输入功率和增益相关,因此也和输出功率有关。因此,在研发和表征阶段通常会创建“浴盆曲线”来显示这种关系。

当器件的功率电平较大时,器件趋向于开始出现信号压缩的饱和点,因此性能会下降,EVM会增加。中间的迹线区域表示理想情况,此时EVM性能最佳。这个区域越宽越好。

在低功率电平下,信噪比随着输入功率降低而减小。EVM再次增加。这种曲线形如浴盆,因此被称为“浴盆曲线”(见图23)。

该曲线通常用于显示不同温度和不同工作条件下的系统优化目标情况,例如增益、最大功率、EVM和最低噪声。

图23:“浴盆”曲线表示的误差矢量幅度



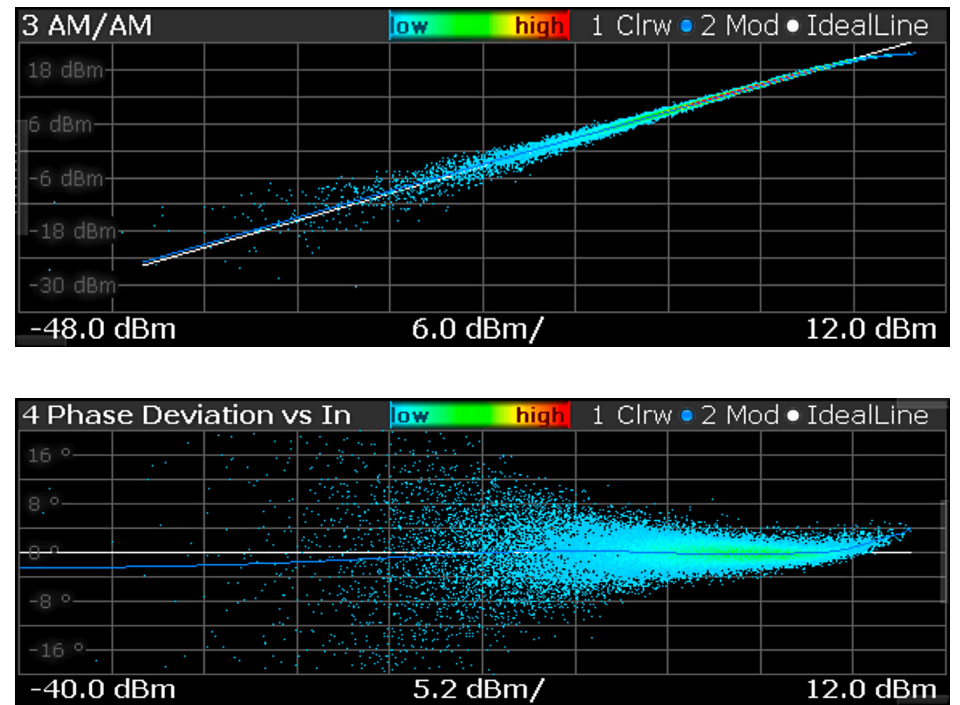
# 研发

## 通过调制测量进行器件验证

### 失真

测量调制信号的幅度或相位失真时, 无需扫描输入功率, 而且由于简单地捕获特定的持续时间, 有益于通过调制保持信号保真度。因此, 功率电平通常差异变化较大且分布良好, 可以直接推导出AM/AM和AM/PM曲线, 具体如图24所示。

图24: AM/AM和AM/PM曲线



# 研发

## 放大器优化

### 优化选项

有许多不同的方案可以优化放大器，但都需要根据目标应用来选择合适的方法。例如，如果仅关注未进行任何调制的连续波信号或脉冲信号，重点应在于最大输出功率和效率，无需考虑调制线性度。这样一来，可以在非常接近饱和的条件下使用放大器，并提供最大输出功率。

调制方案与此不同，放大器需要回退以保证信号保真度，同时提供线性放大。理想情况下，在早期设计阶段可以考虑采用优化方法和模拟，之后通过测量辅助方法在硬件上进行优化。

有几种方法可以采用。第一种方法被称为波形工程，这种方法使用不同的放大器类别，例如A类和B类等。

另一种方法是用户自定义峰值因子降低，这种方法会削减部分峰值，以便放大器更易于工作。

更常见的一种方法是使用不同的拓扑。这包括包络跟踪、Doherty放大器或负载调制平衡放大器。

通常会优先利用数字预失真进行线性化。

### 峰值因子降低(CFR)

峰值因子表示信号的峰值功率与平均功率的比率(见图25)。这些峰值非常罕见，但为了以线性方式传输整个信号，需要保证峰值功率在放大器的线性范围内。

输入放大器的信号被削减了部分罕见峰值，不会对信号成分造成太大的影响。这种信号压缩会引起互调，导致信号频谱扩展。这种高峰值不仅会为放大器带来问题，数字端也需提供余量以支持这些罕见的峰值功率。为了有效进行CFR并减少负面影响，通常还会进行滤波以应对频谱扩展问题。

图25: 峰值因子曲线显示信号中出现最高峰值的概率较低



# 研发

## 放大器优化

### 使用不同的放大器拓扑

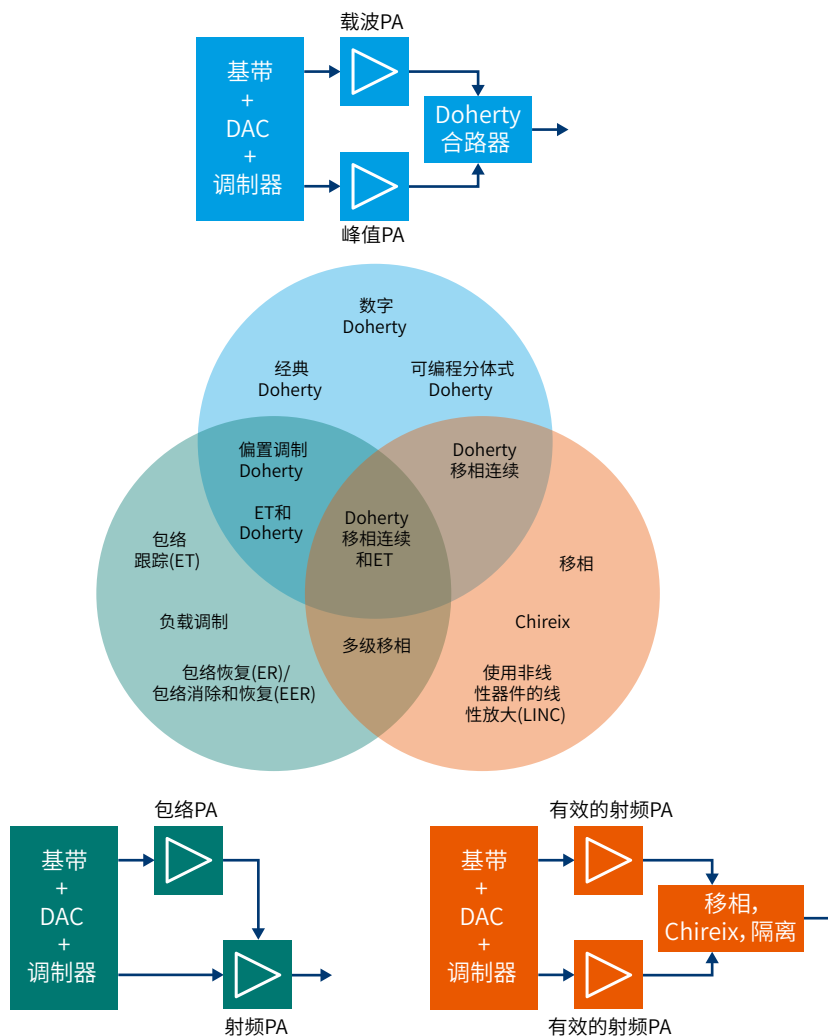
利用不同的拓扑也是一个重要方法,这种方法不更改输入信号,而是改变放大器的结构(见图26)。一种常见方法是利用两个或更多个有效配对的放大器模块来构建信号。共有三种主要的拓扑类型,还有一些混合类型。

三种主要的拓扑类型及其功能如下所述:

- ▶ 包络=相乘
- ▶ 移相=求和
- ▶ Doherty=参考

此外还有一种新类型,即负载调制平衡放大器(LMBA)。

图26:功率放大器拓扑的基本类型,包括混合型





# 研发

## 放大器优化

### 包络跟踪

这种方法通常用于设计移动电话等使用电池的器件(见图27)。这种方法的理念不是为放大器提供恒定功率作为电源,而是由电源跟随射频信号的包络。

如图28所示,为了避免大量能量以热量的形式被耗散,馈入放大器的功率遵循信号包络,因此更加高效。这种方法的难点在于实现高速跟踪,通常须达到信号带宽的三倍。

图27:包络跟踪测试装置

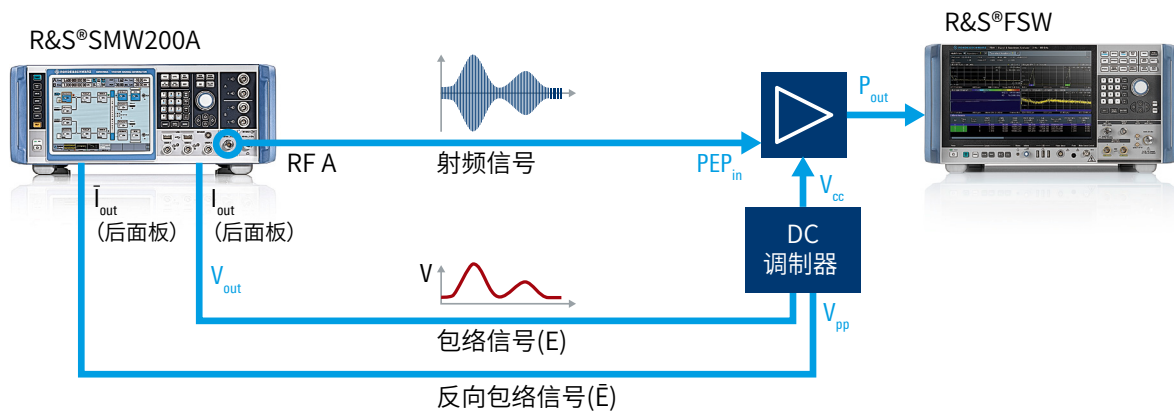
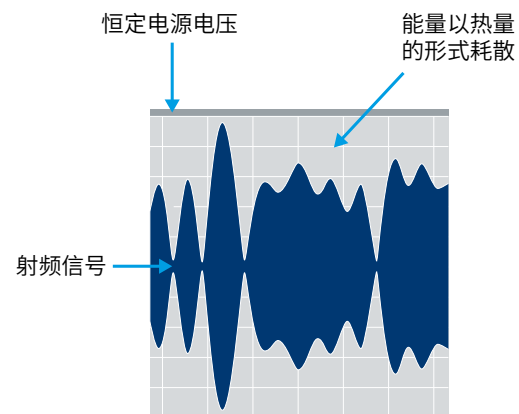


图28:馈入放大器的功率遵循信号包络



# 研发

## 放大器优化

### Doherty放大器

Doherty放大器常用于基础设施场景，能够增加效率。

Doherty拓扑结合了两个放大器，分别用于RMS功率和信号峰值功率(见图29)。用于RMS的主放大器可以在接近饱和的条件下使用，能够实现更高的效率，并为辅助放大器遗留较大的峰值余量。

Doherty有两种不同的设计方案：经典设计和数字设计。如图30所示，经典设计只有一个输入。辅助PA和主PA之间有一个行为不变的固定分路器，信号在此后经过Doherty合路器。通常，这种设计使用不同的偏置器件作为具有不同行为的功率放大器。

图29: Doherty放大器的两个通路

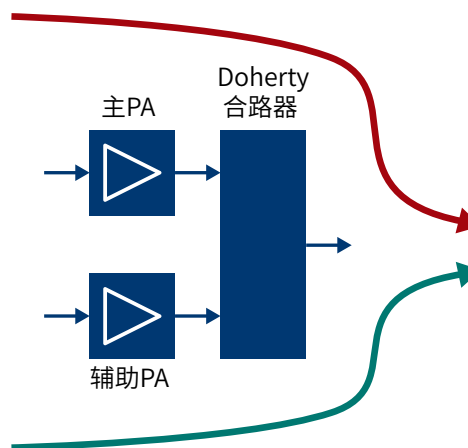
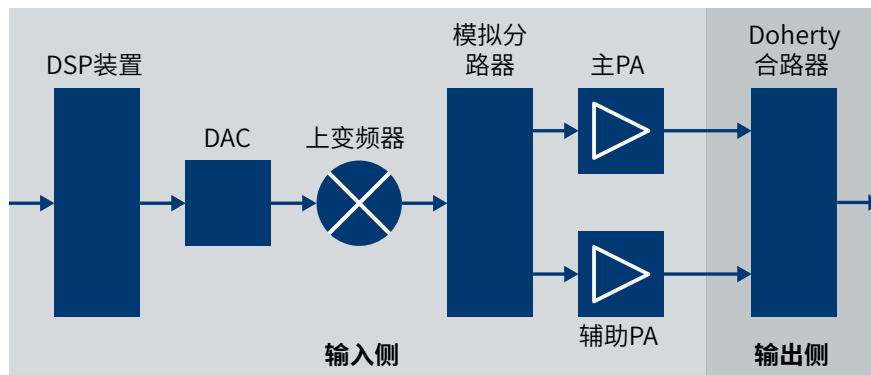


图30: 经典Doherty放大器



# 研发

## 放大器优化

### 数字Doherty放大器

另一种设计方案是数字Doherty放大器(见图31)。这种设计使用两个不同的通道驱动放大器,因此不利用固定的模拟分路器,而是使用数字分路器拆分信号。这样可以将两个单独的信号分别馈入主放大器和辅助放大器。

这种方式能够更好地优化信号行为,更准确地在最佳工作条件下使用放大器。这样能够更加高效地开发Doherty放大器。罗德与施瓦茨提出了一种测量辅助设计流程,可以更好地了解两条通路如何协同实现目标设计,包括实现传统的分路器设计和数字Doherty设计。

建议使用两个信号生成通路,例如可以借助双通道矢量信号发生器,从而为主功率放大器和辅助功率放大器分别提供信号(见图32)。这样可以针对饱和输出功率等指标测量两个信号的幅度和相位关系等值线图,以便确定两个放大器的最佳工作条件。这不仅适用于测量饱和功率,还适用于效率、ACLR和其他感兴趣的指标。

图31:数字双输入Doherty放大器

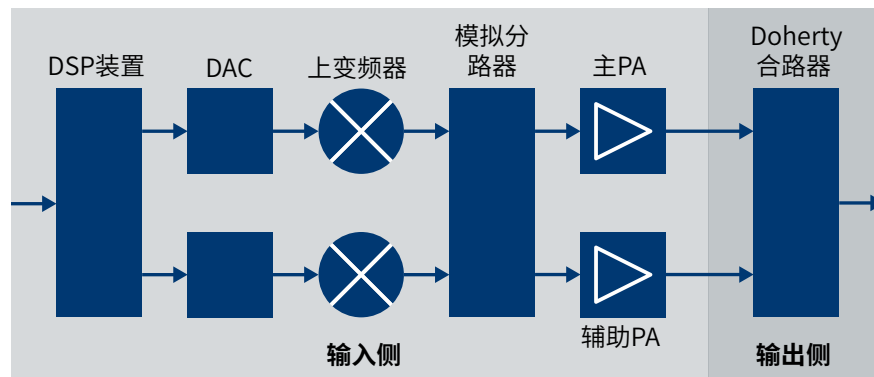
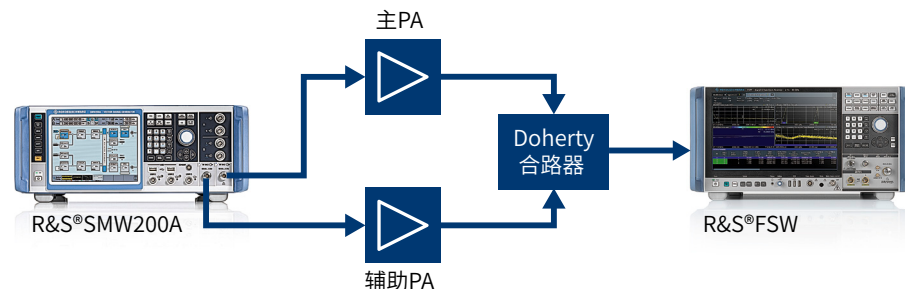


图32:双通道矢量信号发生器有助于深入了解数字Doherty功率放大器



# 研发

## 放大器优化

### 传统和数字Doherty操作

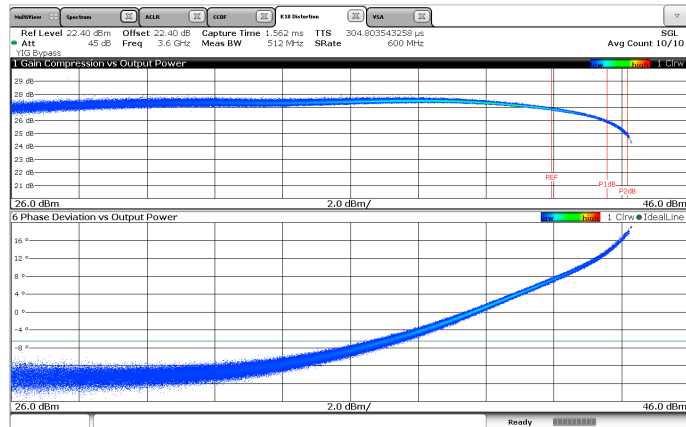
实现最佳效率、饱和功率或ACLR的最佳工作条件各不相同。但是，测量辅助方法能够测量器件在所有指标条件下的行为，便于正确作出设计决定。

图33展示了一个采用传统操作模式的Doherty设计示例。下方是具有最佳特性的数字Doherty设计。这两张图的顶部是增益压缩，底部是相位偏差。理想情况下，相位偏差曲线应尽可能保持平坦，而增益压缩曲线应尽量向外延伸。

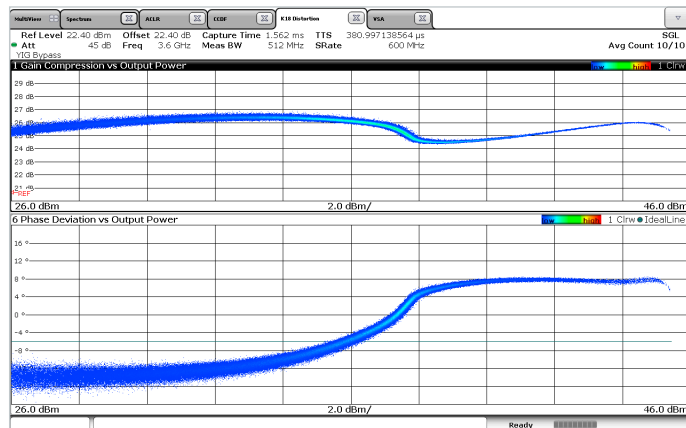
放大器需要尽可能长地表现出线性行为，数字Doherty操作显示出最大输出功率扩展超过1 dB。这样一来，放大器、测试装置中的其他器件或低功率等级器件能够展现出更好的规格特性，以便节省能源，从而降低成本。

图33:可能的Doherty放大器设计

### 传统操作



### 数字Doherty操作



# 研发

## 放大器优化

### 负载调制平衡放大器(LMBA)

LMBA越来越多地被用于扩展带宽以实现特定性能(见图34)。

这种拓扑包括两个平衡放大器和一个控制信号功率驱动器,后者被注入到其中的一个输出以创建负载调制。这种设计能够提供非常大的带宽覆盖范围,覆盖率甚至可以达到100%。

为了减少器件数量,新型正交LMBA应运而生(见图35)。这种器件在输入侧而非负载侧驱动控制信号,并在输出增加固定或调谐负载。

显然,输出的调谐负载也可用于大方差和测量,以便更好地了解针对目标应用的负载调制应如何操作。

图34:负载调制平衡放大器

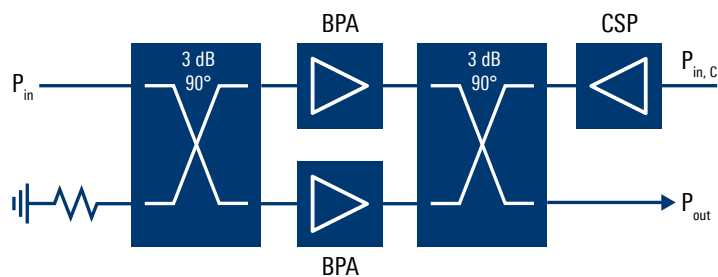
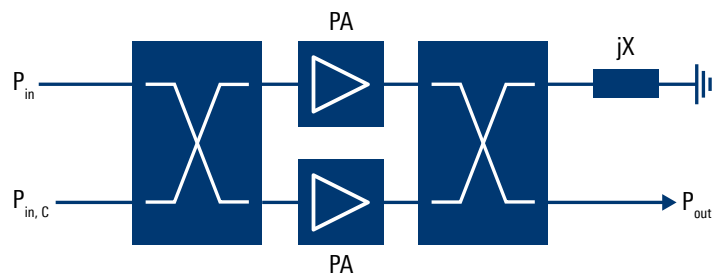


图35:正交LMBA





# 研发

## 放大器优化

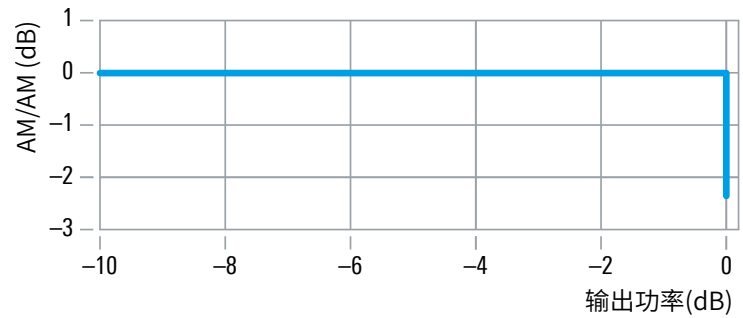
### 线性化

线性化旨在尽可能大范围内地让输出保持线性:AM/AM失真图上的输出曲线应保持平坦,直到遇到砖墙转折点,而AM/PM失真在理想情况下应为零(见图36)。

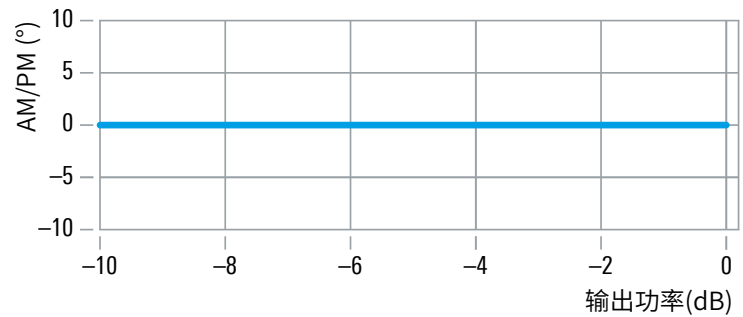
线性化方法有多种,包括笛卡尔、极性反馈、模拟预失真、数字预失真和前馈。

图36:目标失真图

AM/AM失真图



AM/PM失真图



# 研发

## 放大器优化

### 借助数字预失真进行优化

目前, 数字预失真(DPD)很是常见, 支持更加灵活的拓扑结构。这一点很重要, 因为LMBA等拓扑的特定行为非常需要进行线性化(见图37)。

这是为了实现输入和输出信号之间的最佳行为, 例如图38中显示的橘色曲线。输入信号根据蓝色DUT曲线的反函数(图中灰色曲线)进行预失真。这会得到图中的黑色虚线, 并具有理想的砖墙特性。

图37:通过信号预失真来补偿DUT特性

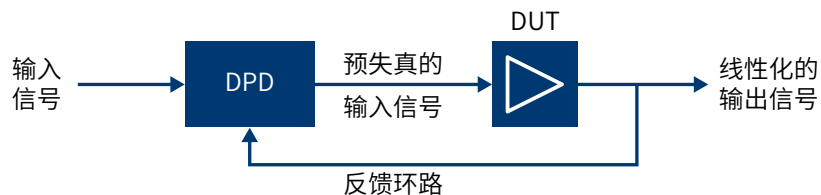
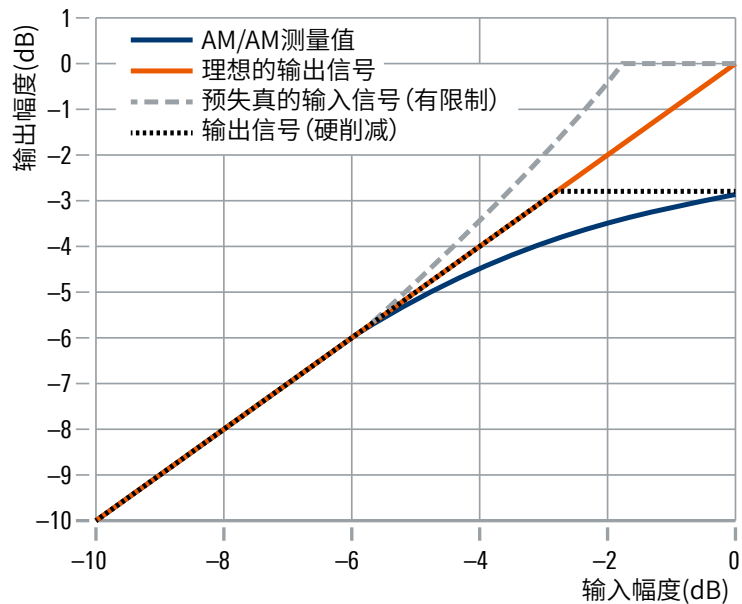


图38:AM/AM测量值、理想的输出信号、预失真的输入信号和硬削减的输出信号概要图



# 研发

## 放大器优化

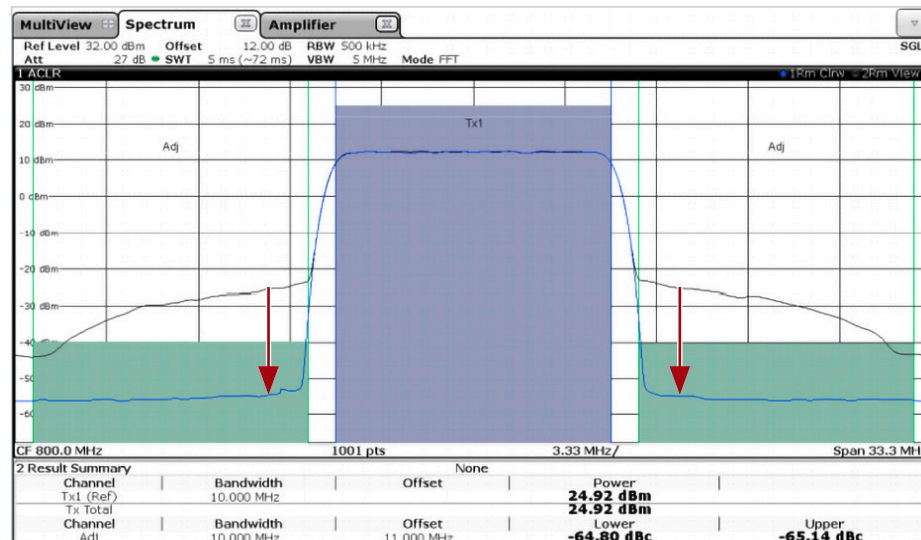
### 预失真示例

如果放大器的操作条件趋向效率最大的压缩点条件,此时放大器的非线性度也最高。因此,需要补偿放大器并进行线性化。理想情况下,设计功率放大器的时候,开发人员希望了解放大器行为的线性化效果如何,例如进行合适的预失真后,放大器的EVM和ACLR性能指标如何?

罗德与施瓦茨提供了一种简单的方法,能够测定放大器在理想预失真情况下的性能。这种方法重复处理输入信号,以在特定的操作条件下实现最佳性能。

这会带来哪些影响?图39对比了未进行预失真(黑色)和进行预失真(蓝色)时放大器的ACLR特性改善情况。

图39:对比未进行预失真(黑色)和进行预失真(蓝色)时放大器的ACLR特性改善情况



# 研发

## 研发阶段总结

在研发阶段,设计人员通常会对首批器件进行模拟和测量,从而优化设计。一般而言,这要求在整个设计流程中满足严格的射频性能要求。

研发阶段的一个主要流程就是器件验证和优化。在这个过程中需要测量许多特性,因此,最好使用一种工具尽可能测量多种特性。VNA就是这样的一种工具。

使用连续波信号或调制方法可以验证器件。连续波方法能够提供有关器件的大量信息,调制方法有助于了解器件在5G或Wi-Fi®应用中的行为。

优化也非常重要,并有多种方法可用,例如波形工程、CFR和不同的放大器拓扑(例如Doherty放大器)。在进入表征阶段之前,线性化和预失真也是用于优化设计的重要方法。

# 表征

表征旨在确保并非只有单个器件或少量样品满足设计目标;相反,这个阶段会检查大量样品,然后再将其投入生产。

在这个过程中,同样需要获得并验证各种规格和性能系数。

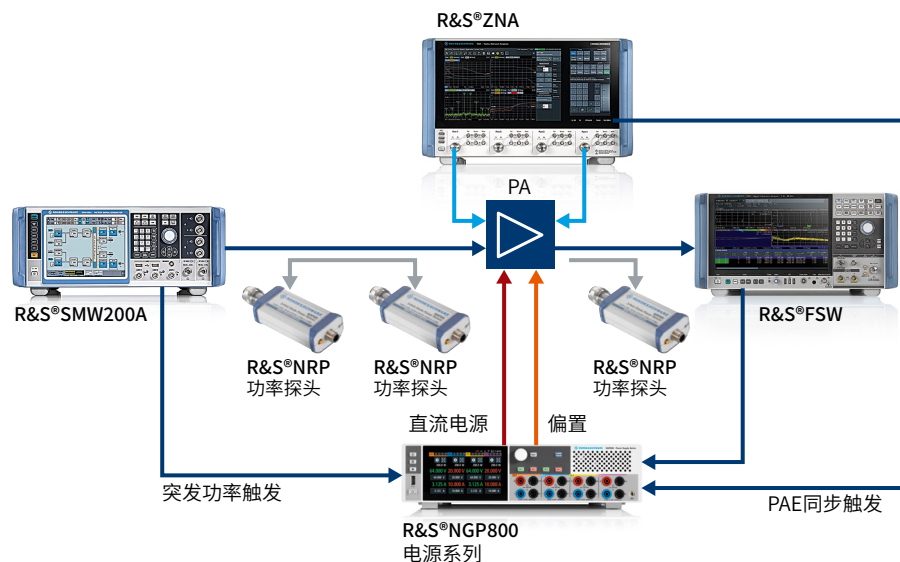
表征阶段的另一个重点是更好地了解器件在不同频率、电平和温度条件下的特性。

表征和研发阶段会检测相同的射频指标,因此需要使用类似的测试装置。如图40所示,矢量网络分析仪(VNA)可用于连续波测量和阻抗匹配测量。该测试装置中的矢量信号发生器(VSG)和矢量信号分析仪(VSA)可用于调制测量,电源能够测量测试器件的功耗,从而测量器件的效率。

有源器件需要通过连续波和调制测试来进行多样化表征,通常会如图40所示使用一个或两个单独的测试台来进行连续波和调制测试。

不过,只连接一次DUT来进行所有测试,能够更加快速平稳地完成测试,不必重新连接器件。

图40:完整的功率放大器测试台





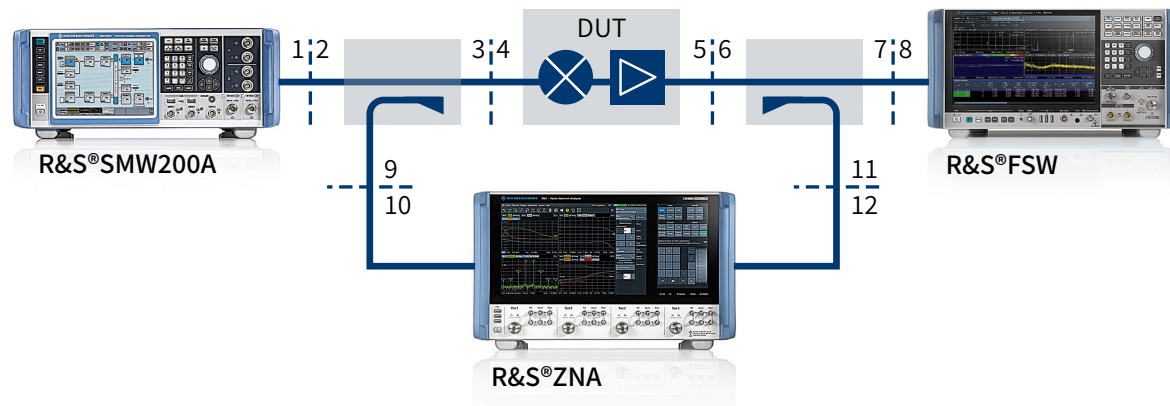
# 表征

为了获得连续波测量和EVM等调制测量的矢量校正结果,建议使用图41所示的系统,其中包括左侧的信号发生器、右侧的信号分析仪和下方的矢量网络分析仪。耦合器可用于连接器件。校准所有器件之后,装置能够自动完成不同的测量任务。

通常,还会利用高加速寿命测试(HALT)方法进行压力测试,以对振动、温度、湿度和过量输入功率进行压力测试。

在测试过程中,压力会逐渐增加,从而检查器件的相应性能。这有助于确定DUT的性能限制。这种测试有助于更好地了解器件发生故障之前的行为,借此揭示产品的预期使用寿命。

图41:连续波和EVM矢量校正测量的测试装置



# 生产

生产阶段的测试需要准确测量每个器件，确保这些器件功能正常并满足规格要求。另一个测试重点是测量的吞吐量和速度以期降低成本，因此，不同样品测量的可重复性比绝对测量精度更加重要。

生产测试通常分为两个阶段。第一个阶段是进行晶圆级测试，以确保晶圆运行正常，可以封装以进行最终测试。第二个阶段是对封装器件进行全面测试。

测试流程一般基于表征测试，主要测试关键性能指标。使用多端口VNA等仪器同步进行测试有助于提高吞吐量。

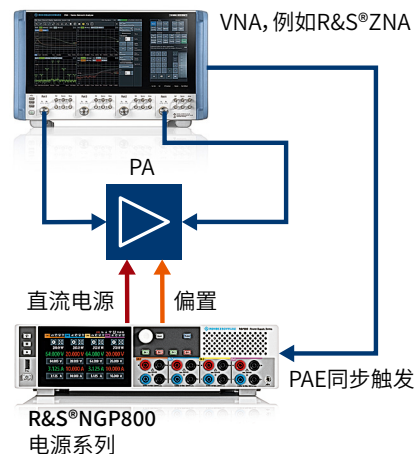
通常，测试台仅进行连续波测量或调制测量，以简化测试装置并降低成本。图42的测试装置针对连续波测量进行了优化。

在生产测试中，负载板可用于连接一个或多个测试器件。这解决了射频、直流和控制信号的问题，保证正确进行测试。负载板还可以包含额外电路，以为不同的测试器件提供所需的电压或匹配。

因此，需要对DUT端口进行校准，并对器件进行去嵌处理。绝对精度完全取决于对整个系统进行校准。较长的电缆和信号线一般有个缺点，即降低功率和灵敏度。

因此，需要保证出色的测量可重复性和信噪比，以满足测量精度要求。同时，还需要使用更具经济效益的研发和表征测试方法，以便尽可能降低成本。

图42: 针对连续波进行优化的测试装置



## 经过优化的生产线调制测试

在表征和生产阶段，测试操作人员可以利用易于操作的一体化收发信机解决方案，该解决方案整合了信号生成和分析等所有必需功能，并满足表征测试的射频性能标准（对比图43与图44）。

生产测试的重点是优化速度，以提高吞吐量、减小尺寸并尽可能降低每次测试的成本，同时保证适当的射频性能。

整个价值链中所用装置的相关性非常重要。研发阶段的参考测试与生产阶段的测试采用相同的信号生成和分析算法，有助于保证测试装置的相关性。如图45所示，这种实验室参考测试台装置包括R&S®SMW200A矢量信号发生器和R&S®FSW信号与频谱分析仪。

集成式收发信机测试方法直接同步收发信机内部的VSG和VSA功能，测试速度更快。理想情况下，测试脚本可以直接在收发信机上运行，以提高测试速度和吞吐量。

罗德与施瓦茨开发的PVT360A性能矢量测试仪满足这些要求（见图46）。

这款小巧易用的测试仪支持机架安装，并针对射频器件测试进行了优化，可在任何生产线中使用。测试仪可以内置另一台可选的收发信机，从而同步测试两台器件。

图43: 优化了性能的调制测试装置

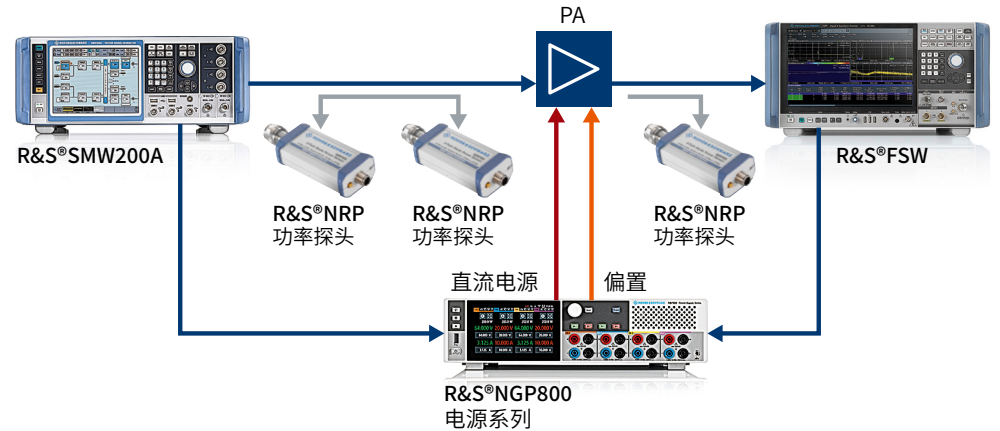
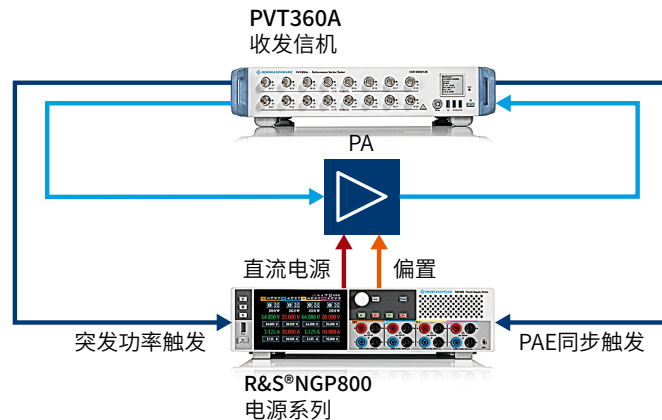


图44: 优化了速度和尺寸的调制测试装置



# 生产

为了简化生产环境中的复杂射频器件表征，PVT360A针对生产应用集成多种精简的功能和性能，例如EVM测量、频率范围和调制带宽。这是为了最大限度地缩短测试周期，提高生产吞吐量。测试仪的矢量信号生成和分析功能可以同步运行，提高了测试速度，同时保证最高性能。

测试仪的诸多功能支持自动化测试，确保精确测量，有助于简化生产流程，保证测试协议的一致性。生产测试根据预定规格评估器件，增强了所产器件的稳定性、可靠性和质量。

测试仪在两个内部收发信机之上集成具有多达16个端口的开关矩阵，支持同步测试两个器件，快速切换器件的不同端口，还可以通过一个负载板连接多个DUT。

图45:基于R&S®SMW200A和R&S®FSW的参考测试台适合实验室测试



图46:PT360A性能矢量测试仪



# 结语

- ▶ 结合连续波测试、调制测试与不同的测试方法,才能实现高效、完整的测试
- ▶ Doherty等特定拓扑需要专门的测试场景
- ▶ 线性化技术发展迅速,能够提高功率放大器设计的性能和灵活性
- ▶ 通过复制实验室的参考测试站,单台的为产线优化的测试仪表能够更加简单、快速、高效地测试生产单元,并提供可靠的测试结果



# 缩写

ACLR 邻道泄漏比  
ACP 邻道功率  
BPA 平衡功率放大器  
CFR 峰值因子降低  
CSP 控制信号功率  
CW 连续波  
DAC 数模转换器  
DPD 数字预失真  
DUT 被测设备  
EDA 电子设计自动化  
ER 包络恢复  
EER 包络消除和恢复  
ET 包络跟踪

EVM 误差矢量幅度  
FET 场效应晶体管  
HALT 高加速寿命测试  
LINC 使用非线性器件的线性放大  
LMBA 负载调制平衡放大器  
PA 功率放大器  
PAE 功率附加效率  
PAPR 峰均功率比  
SNR 信噪比  
VNA 矢量网络分析仪  
VSA 矢量信号分析仪  
VSG 矢量信号发生器

## 关于罗德与施瓦茨公司

作为测试测量、技术系统以及网络安全方面的行业先驱, Rohde & Schwarz 科技集团通过先进方案为世界安全联网保驾护航。集团成立于90年前, 致力于为全球工业企业和政府部门的客户提供可靠服务。集团总部位于德国慕尼黑, 在全球70多个国家和地区设有分支机构, 拥有广阔的销售和服务网络。

## 罗德与施瓦茨(中国)科技有限公司

[www.rohde-schwarz.com.cn](http://www.rohde-schwarz.com.cn)

罗德与施瓦茨公司官方微信

## 罗德与施瓦茨客户支持

[www.rohde-schwarz.com/support](http://www.rohde-schwarz.com/support)

