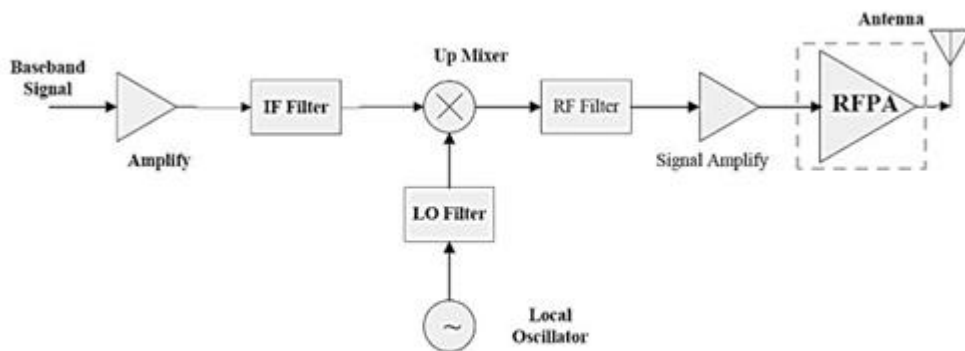


功率放大器 PA

PA简介

射频PA位于发射系统的后端（射频前端），主要用于将射频信号放大至特定的功率，然后传输给天线发射出去。



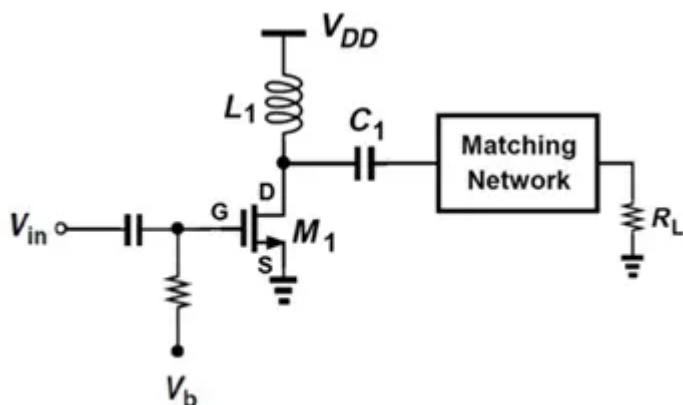
Transmitter Block Diagram

知乎 @Marco

这里注意区分PA和小信号放大器的区别。简单地讲，小信号放大器主要用于对信号的电压幅度进行放大，常用于信号处理和运算，比如运算放大器。它的电流放大能力很弱，因此输出的功率很小，经常可以忽略。功率放大器的主要作用是使信号获得较大的功率增益，因此它不仅具有电压放大，更要有较大的电流放大能力，可以输出较大的功率。PA电路的输出阻抗一般都很低，使得它能够驱动较大的负载（比如手机里的扬声器和马达振子）。

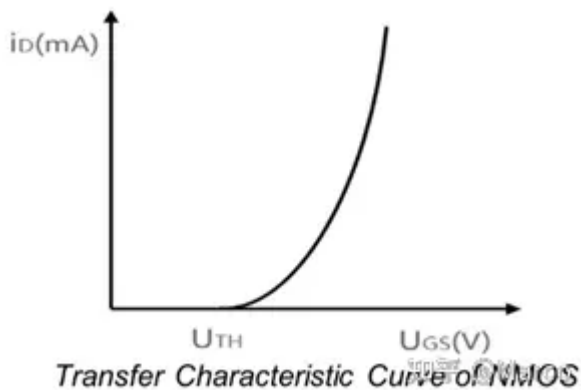
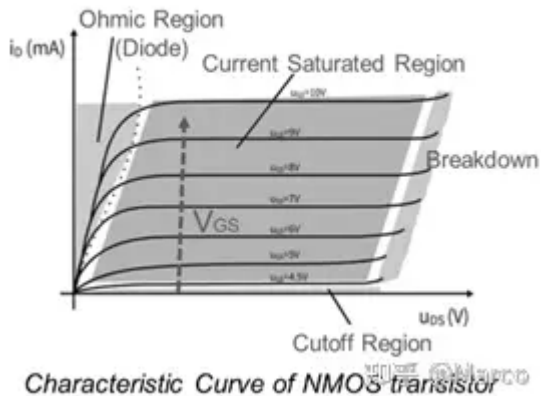
射频PA拓扑

典型的射频PA电路由以下四部分构成：晶体管，偏置电路，直流电源和输入输出匹配电路。如下图所示：



RF PA topology 知乎 @Marco

其中 L_1 是射频扼流圈，主要作用是抑制电源中的交流成分串入，相当于一个直流电流源。 C_1 是一个隔直电容，用来限制直流成分流入负载。电路的核心器件是晶体管（BJT或者MOSFET），用于对信号功率进行放大。根据晶体管的工作原理，以MOS管为例，在晶体管三端加上不同的电压可以使其工作在不同的区域。



比如，当 $V_{gs} < V_{th}$ 时，晶体管工作在截止区，此时晶体管未导通，相当于一个断开的开关；当 $V_{gs} > V_{th}$ 且 $V_{ds} < V_{gs} - V_{gs(th)}$ 时，晶体管工作在三极管区（欧姆区），此时MOS管的沟道是导通的，相当于一个闭合的开关；当 $V_{gs} > V_{th}$ 且 $V_{ds} > V_{gs} - V_{gs(th)}$ 时，晶体管工作在恒流区（饱和区），此时导电沟道开始夹断，漏极电流只与 V_{gs} 有关，晶体管可用作放大器使用。

PA的主要指标

输出功率和增益

输出功率：PA的额定输出功率 P_{out} 指的是在给定输出阻抗和电压条件下PA能够输出的最大功率，单位是瓦或dBm。

$$P_{dBm} = 10 * \log_{10} \left(\frac{P_{out}}{1mW} \right)$$

功率增益：输出功率和输入功率的比值，单位是dB，它反映了PA对信号的放大能力。

$$G_{dB} = 10 * \log_{10} \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) = (P_{out})_{dBm} - (P_{in})_{dBm}$$

效率

功放的效率有两种表示方式。第一种是我们常见的用 η 表示，对于FET管称为漏极效率，对于三极管而言称为集电极效率，其定义为：

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{supp}}$$

这种表示方法直接将功放的输出功率和电源的供电功率相除，虽然简单但是并不能看出它和输入功率的关系，比如如果PA的输入功率本来就很高，那么输出功率很高并不能说明其功率放大性能就很好。所以又引入了另一种评价PA效率的方法，PAE(Power Added Efficiency)，即功率附加效率，其表示为：

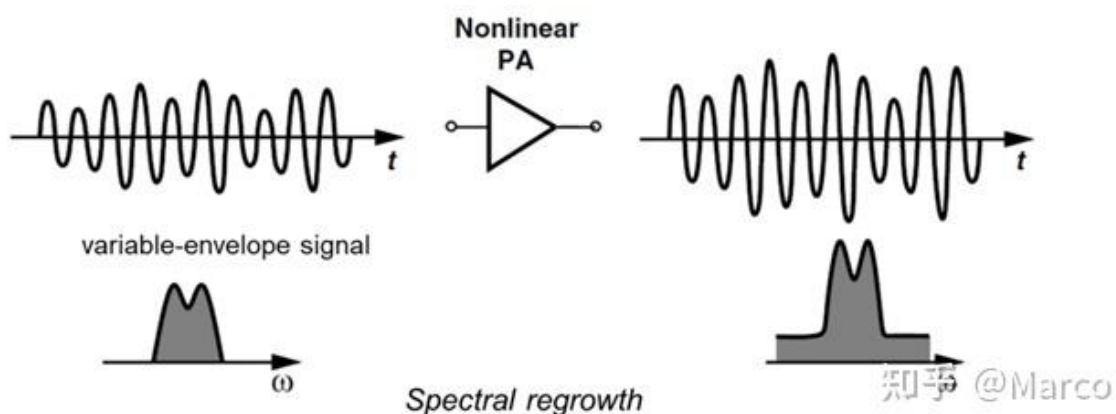
$$PAE = \frac{P_{out} - P_{in}}{P_{supp}}$$

由其表达式可以看出，它能反映输入功率，输出功率和电压供电功率三者的关系，所以在PA设计的时候一般会用这种表示方法，PA的datasheet中同样也会采用这种方法来描述PA的效率。

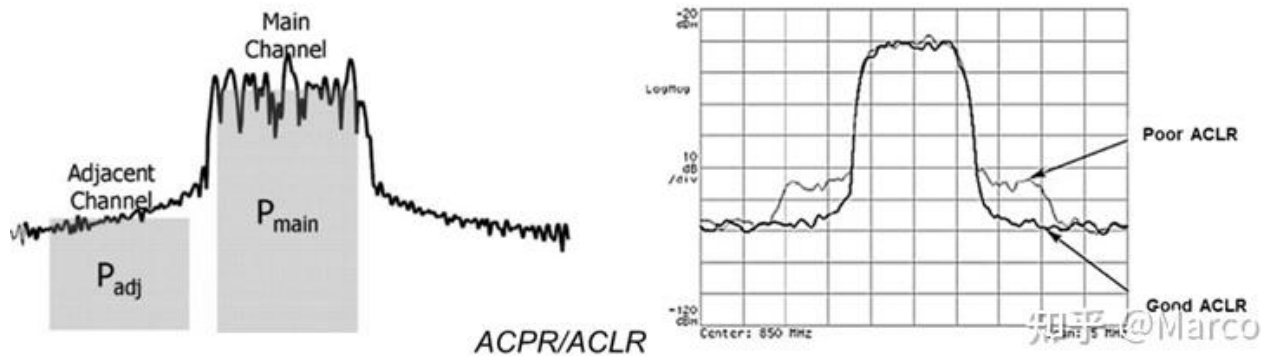
非线性

信号通过非线性器件会出现很多非线性现象，比如谐波失真，增益压缩，互调，交调，AM-PM转换等。PA属于非线性器件，同样也会出现以上的问题。这里主要讨论两个和PA联系比较紧密的问题：邻频高功率和幅度压缩。

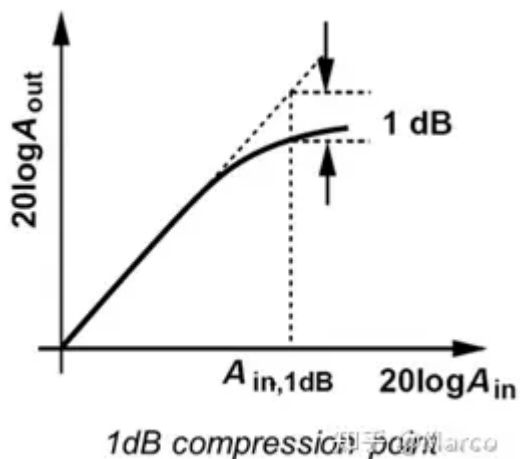
我们知道，当一个非恒包络的信号通过非线性器件时，相邻频率互相调制会出现高阶互调产物，其携带的能量落在相邻信道内就会对该信道的信号造成干扰。我们把这种信号通过非线性器件后频谱扩展的现象称为频谱再生。



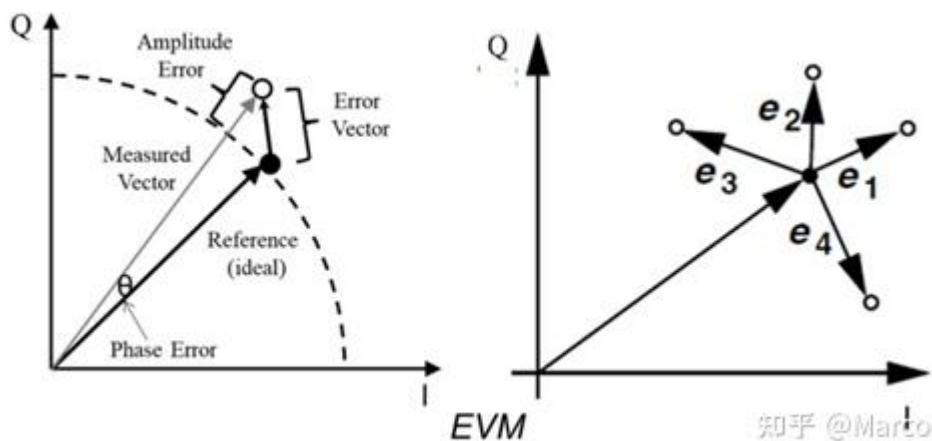
为了衡量这种现象的影响程度引入了一个量测指标，ACPR/ACLR (Adjacent Channel Power/Leakage Ratio)，即邻频功率比或邻频泄露比。定义为临近信道的平均功率和主信道功率的比值，其值越大代表对相邻信道的干扰越大。如下图所示



另一种由于非线性引起的现象增益压缩。当一个幅度中含有信息的信号（比如QAM）通过PA时，输入功率达到一定程度以后，PA的增益会出现压缩的现象。衡量压缩程度的指标一般用1dB压缩点来描述，它表示当输出理想值和实际值相差1dB时的输入功率或输出功率。



实际上，通信系统中发射的信号不仅有幅度的变化，还会由于噪声等因素产生相位的变化。其变化的程度一般用EVM来衡量，在星座图中表示为实际测得的信号和理想信号之间的矢量差值。

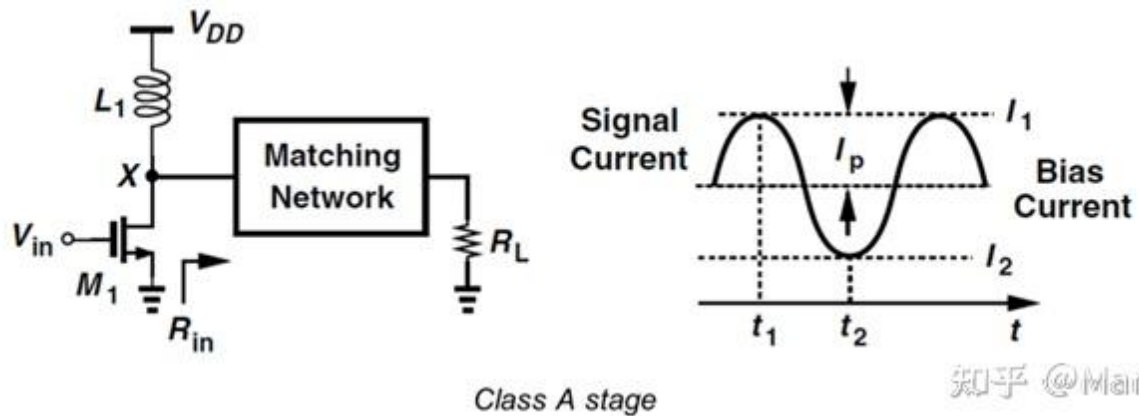


PA的分类

讲PA的分类之前，我们首先定义一个导通角的概念，它表示晶体管在一个信号周期内的导通时间与信号周期的比值，然后再乘以 360° 。即晶体管导通时间所占信号周期的比例，用角度来衡量。

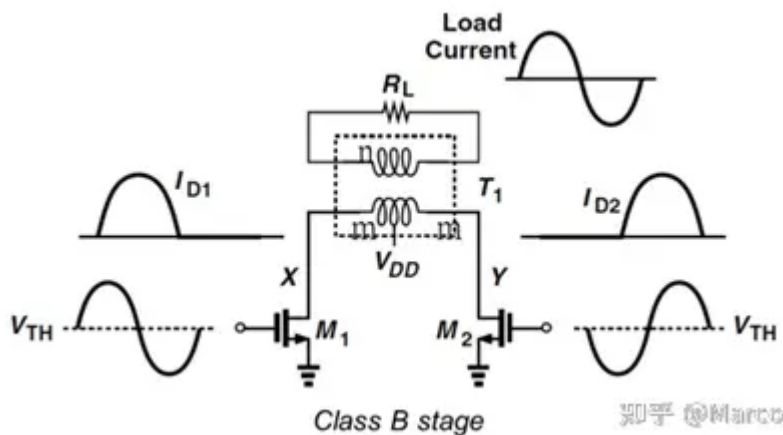
A类功放

A类功放指的是在整个信号周期内晶体管一直都处于导通状态的功放。如图所示，设置合适的偏置电路，使偏置电流大于信号电流的峰值，这样就能确保晶体管始终导通。根据导通角的概念我们知道，A类功放的导通角是 360° 。我们可以计算，A类功放的最大传输效率是50%。



B类功放

传统的B类功放电路一般使用两个并联的晶体管电路，并让每一个晶体管各自导通 180° ，这样就能获得比A类功放更高的效率。如图，信号的正半周期使 M_1 导通，负半周期使 M_2 导通，两路反向信号通过巴伦耦合到负载进行叠加，就可以实现对信号的线性放大。对电路选择合适的参数，可求得B类功放的最大传输效率达到78.5%。

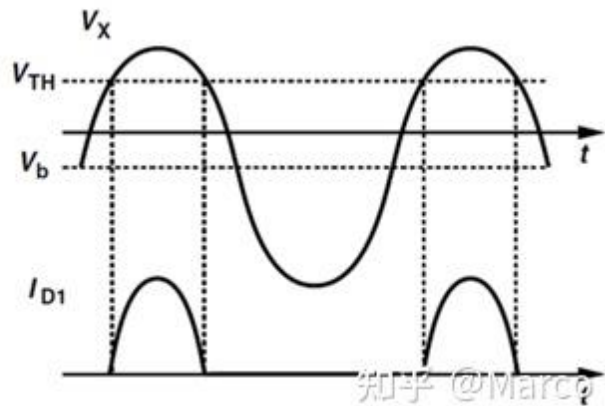
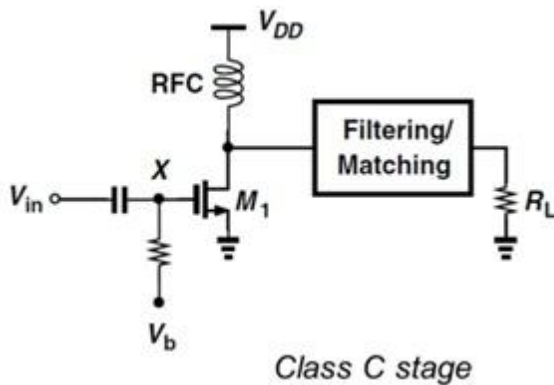


AB类功放

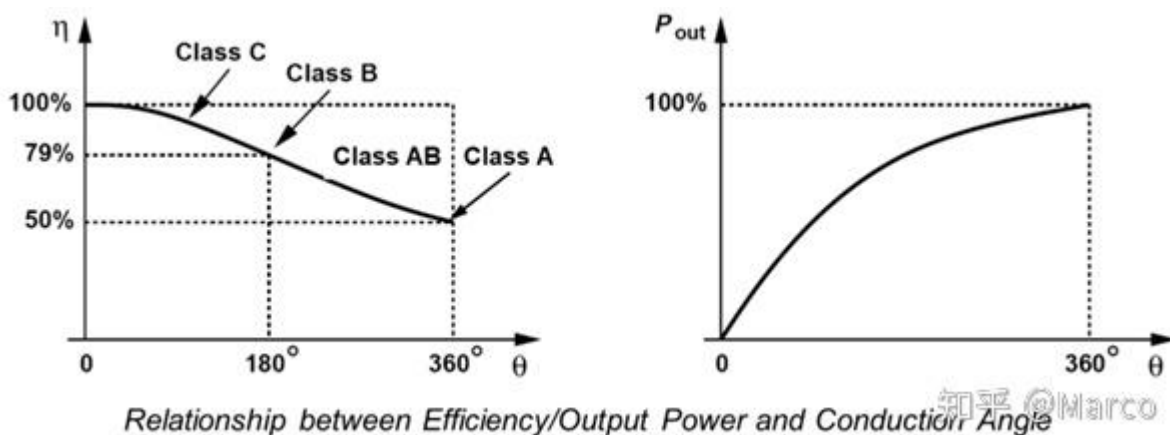
AB类功放实际上是对B类功放的改进。当B类功放的输入信号低于阈值电压时晶体管截止会出现截止失真，此时在信号0值附近会出现交越失真。AB类功放使每一晶体管处于微导通状态，从而避开死区电压区，一旦有信号输入，就可以使其迅速进入线性工作区。AB类功放的导通角介于A类和B类之间，其效率同样介于两者之间。

C类功放

为了进一步提高PA的效率，人们又设计出了C类功放。C类功放的导通角被进一步减小，晶体管只在信号的峰值附近导通，使得它能够获得更高的效率。但是由于输入波形要靠后面的谐振回路恢复，产生了很大的失真，因此此类功放已较少使用。



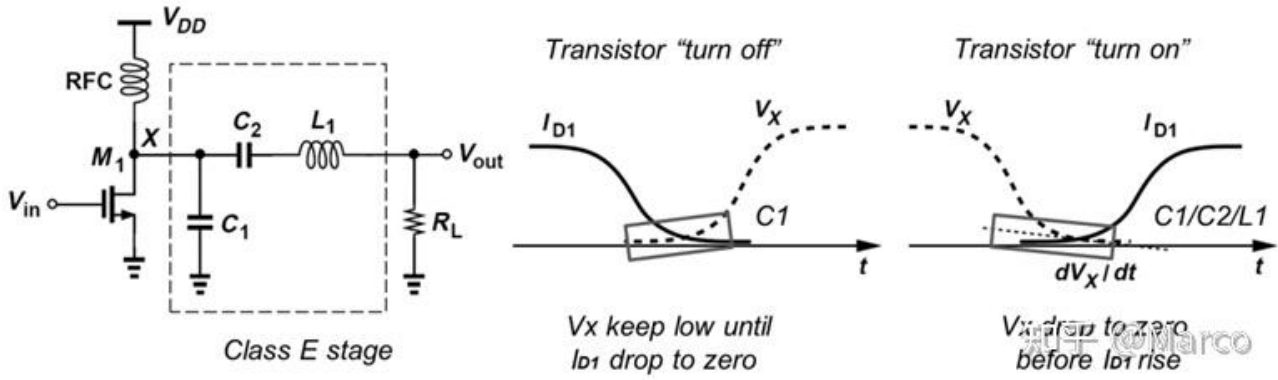
比较以上几类功放我们发现，导通角减小可以使PA具有更高的效率。实际上也是如此，导通角减小意味着晶体管的导通时间会减小，因此会消耗更小的能量，然而这也意味着晶体管输出的功率会更小，比如当导通角减小到0的时候，晶体管将不再有功率输出。



有没有一类功放既有较高的效率又能有较大的功率输出呢？刚开始的时候我们讲过，晶体管既可以工作在放大状态也可以工作在开关状态，而让晶体管工作在开关状态就能轻松地实现以上的愿望。试想如果晶体管是一个理想的开关，当开关闭合的时候它相当于一根导线，本身没有电压，当开关断开的时候，虽然漏源两端有电压，但是却没有电流，两种情况下晶体管消耗的功率都为0。D类，E类和F类功放就是根据这种特性设计的PA。然而，晶体管的特性决定了它不可能是一个理想的开关，它从截止到完全饱和同样也需要有一个过渡的过程，这就意味着即使它能当作开关使用，仍然是会消耗能量的。幸运的是，我们可以通过合适的设计来减小这种能量损耗。

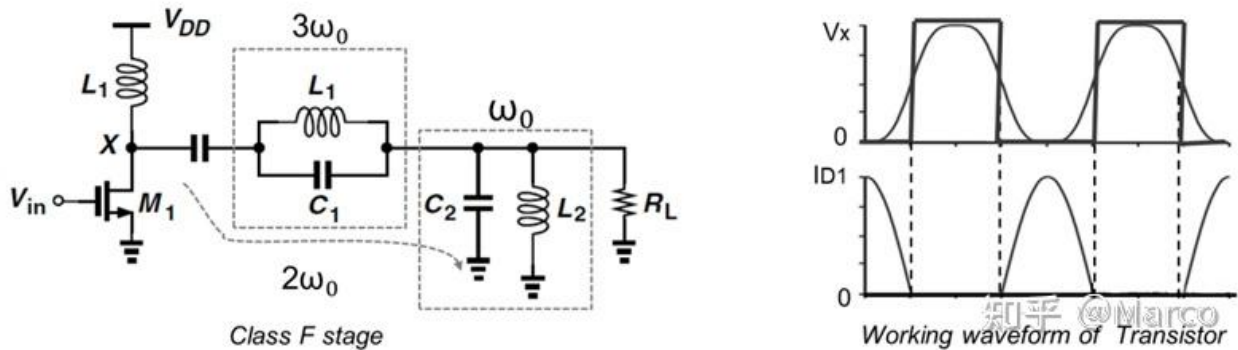
E类功放

E类功放通过设计合适的负载网络，使当晶体管“断开”的时候，在流过晶体管的电流降为0之前，漏极电压能够保持一个很低值。而当晶体管“闭合”的时候，在晶体管有电流通过之前，漏极电压能够快速减小到0。这样晶体管电压和电流总有一个为0，因此消耗的功率也为0。



F类功放

F类功放属于谐波增强类功放，它将负载网络设计成对奇次谐波具有阻碍作用，而只允许偶次谐波通过，这样漏极电压就等于奇次谐波的叠加，近似为方波，电压和电流重叠的区域就很小，晶体管消耗功率很低。



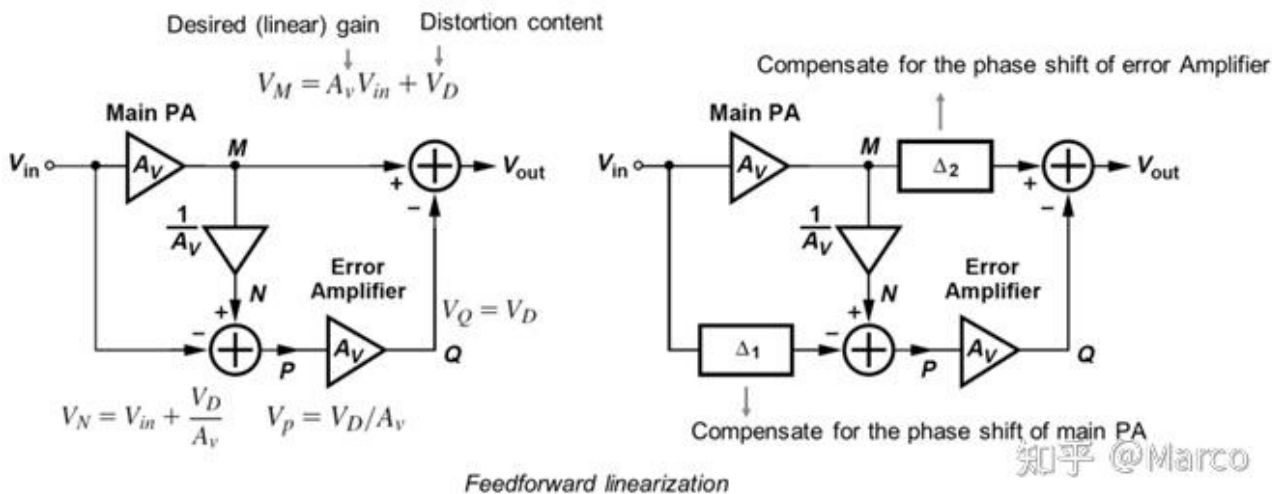
下表是对几类PA的比较，可以看到，不同种类的PA都是线性度和效率的折衷。比如A类功放，它的线性度很高，但是其效率最大只能达到50%，也就是会有一半的功率用到器件发热上了。再比如开关型功放，它们的理论效率可以达到100%，但是它们的输出并不是对输入信号的线性放大，因此其线性度很差。

Type	A	AB	B	C	D	E	F
Operation Mode	Current source	Current source	Current source	Current source	Switch	Switch	Switch
Conduction Angle	360°	180°-360°	180°	0°-180°	180°	180°	180°
Output Power	Medium	Medium	Medium	Low	High	High	High
Theoretical Efficiency	50%	50% -79%	79%	79% -100%	100%	100%	100%
Typical Efficiency	35%	35% -60%	60%	70%	75%	80%	75%
Gain	High	Medium	Medium	Low	Low	Low	Low
Linearity	Excellent	Good	Good	Poor	Poor	Poor	Poor
Drain Peak Voltage	2Vdc	2Vdc	2Vdc	2Vdc	2Vdc	2Vdc	2Vdc

基本线性化技术

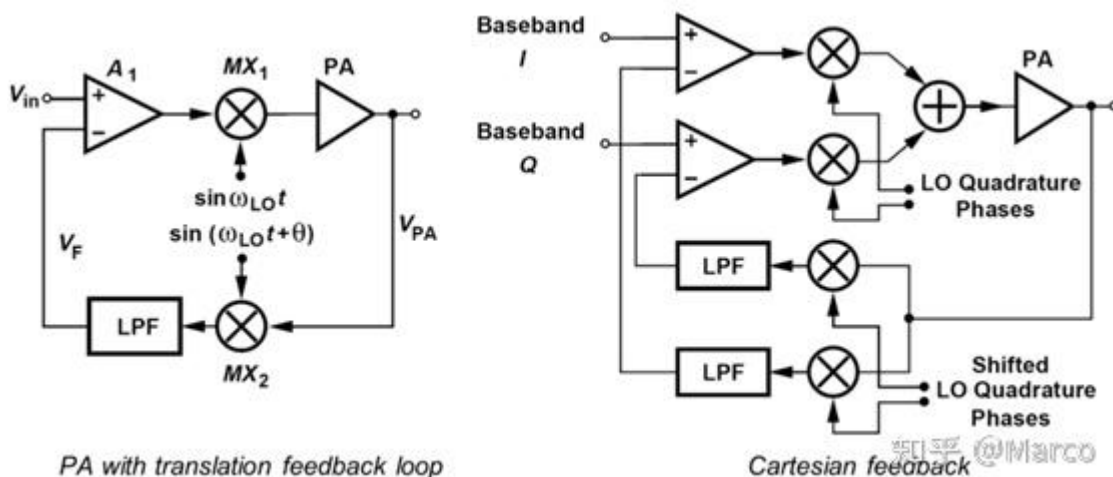
前馈 (Feedforward)

前馈技术的基本思想是将PA放大后的非线性功率信号看作是一个线性信号和其失真部分的叠加，然后通过一个前馈通路将失真部分计算出来，接着通过减法器将该部分减去，最后得到的就是线性放大的信号。在实际的电路应用中，为了匹配PA信号的时间延迟需要用用到延时器对相位进行补偿。前馈电路的优点是电路较为稳定，且对放大信号的带宽没有限制。其缺点是如果延时器是用无源元件做的就会产生功率损耗，如果是用有源器件做的就会引起新的失真。



笛卡尔反馈 (Cartesian Feedback)

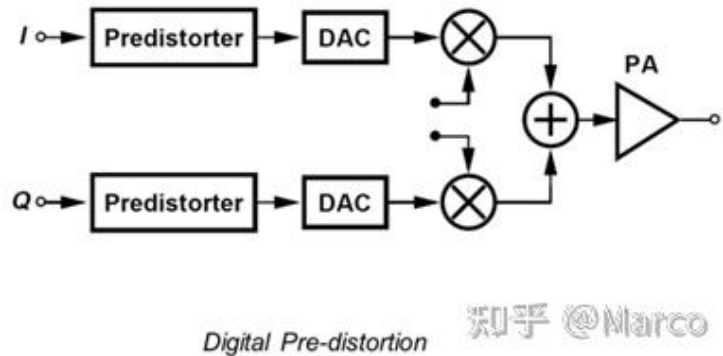
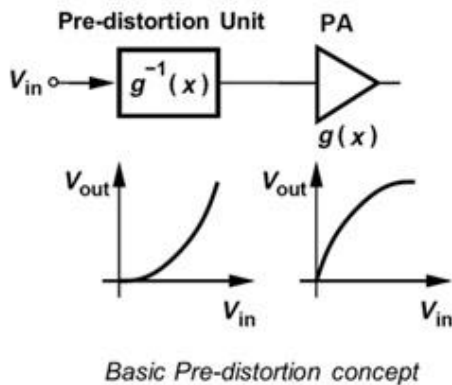
我们知道，高频电路一般都是开环电路，因为如果在高频下引入反馈，反馈通路的寄生电抗所引起的寄生振荡会使电路不稳定。不过我们可以将PA放大后的信号通过Mixer进行下变频成低频信号，然后再引入输入端进行反馈补偿，这样就可以使PA放大信号接近线性。实际电路中我们往往先将基带信号通过正交调制成I, Q两路正交信号，然后分别对各路信号进行反馈，这种方式称为笛卡尔反馈。由于I, Q两路可以采用完全相同的电路，所以可以避免路径失配的问题。但是这种技术的难点在于对反馈通路的相位补偿不易控制，因为环路的相位会随温度和制程等因素的变化而处在不断变化之中。



预失真 (Predistortion)

假如我们已知一个PA的非线性特性，那么就可以在它前面或后面插入一个与其特性相反的预失真器件，利用预失真器与PA电路正交相反的非线性特性抵消PA的非线性产物，实现功放的线性放大。在实际的电路中常采用数字预失真的方法，通过增加采样频率或量化的阶数等方式，可以实现对失真的精准抵消。这种技术的优点是成本很低且易于应用，其缺点是

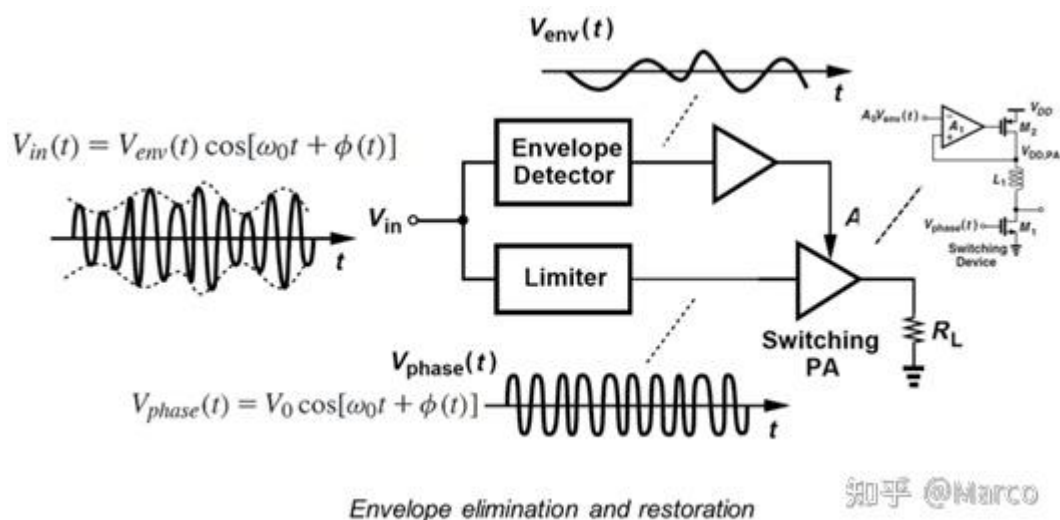
PA的非线性会随着温度和负载阻抗等的变化而变化，而预失真器往往不会随这些因素变化，这会使系统的性能下降。



知乎 @Marco

极化调制 (Polar Modulation)

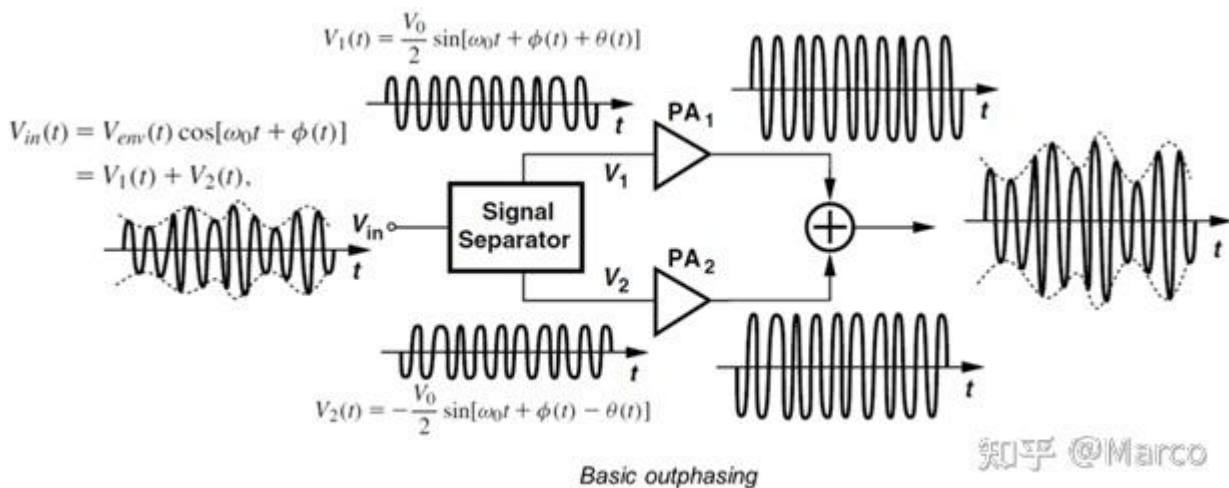
其基本思路是将信号分成两路，一路通过包络检测器提取出包络信号，另一路通过限幅器生成一个恒包络的调相信号，然后再将这两路信号叠加在PA上。由于PA放大的是恒包络的调相信号，所以输出信号不会出现非线性的问题，这时的PA往往可以选择开关型PA，使得电路可以获得较高的效率。信号的包络信息是通过漏极调制的方式叠加到PA上的，而包络检测电路需要用到缓冲器来限制大电流，这实际上会导致一部分效率和电压裕度被消耗。



知乎 @Marco

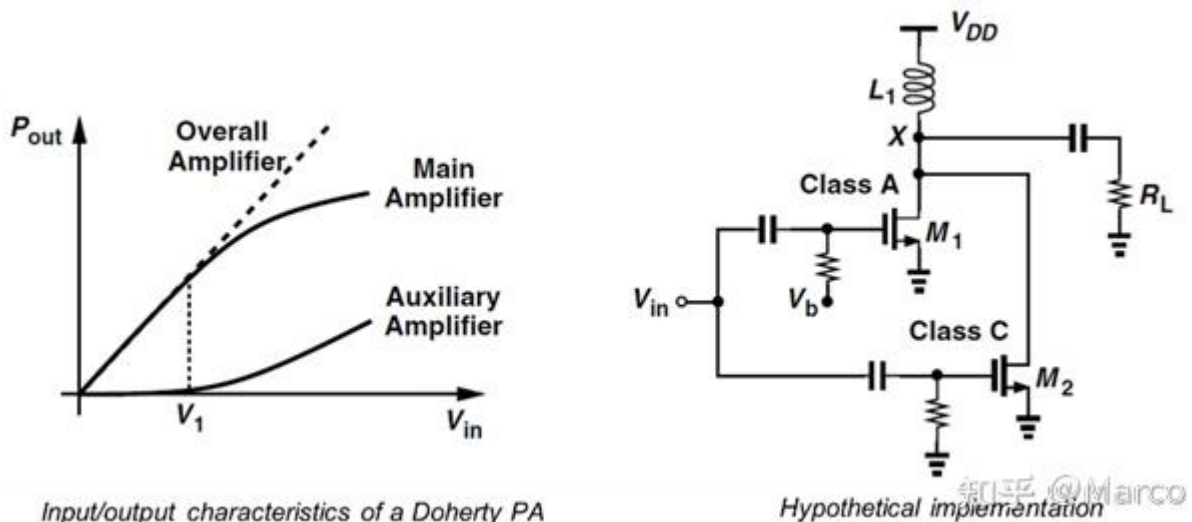
异相 (Outphasing)

也常成为LINC (Linear Amplifier Using Non-linear Components)，即使用非线性元件的线性放大器。其基本思想是将非恒包络信号通过一个信号分离器分解成两路恒包络的调相信号，分别通过两路PA放大，最后在输出端合成非恒包络信号，由于PA放大的是恒包络的调相信号，所以输出信号就不会出现非线性的问题。这个电路的缺点是如果一路信号有延时，将会导致两路信号的相位不匹配，进而造成输出的信号相比原信号有失真，从而产生带内失真和带外干扰。



Doherty PA

Doherty PA是一种高效率的PA，它由一个主PA和一个辅助PA构成，当主PA出现增益压缩时辅PA开始工作，对主PA的增益进行补充，使得系统的整体增益近似于线性。Doherty PA可以使系统的线性区间延展6dB，并且理论上可以达到79%的效率。该电路的缺点是两路PA会引入了两路损耗，从而会减小系统的效。而且辅助PA频繁的通断会产生开关频谱，也会造成邻近信道的高功率。



对比以上几种线性化技术我们发现，前馈，极化调制和异相技术能够提供较大的线性度提升，但是它们的电路相对比较复杂。预失真和笛卡尔反馈的电路相对简单，但是它们提供的非线性放大能力有限。所以当我们给系统选择非线性方案的时候，需要综合考虑各种因素。

Linearization Techniques	Linearity Improvement	PAE	Bandwidth	Stability	Complexity
Feedforward	High	Medium	Wide	Good	High
Cartesian Feedback	Low	Low	Narrow	Good	Low
Predistortion	Medium	Medium	Medium	Medium	Medium
Polar Modulation	High	High	Narrow	Medium	High
Outphasing	High	High	Medium	Medium	High
Doherty PA	High	Medium	Narrow	Medium	High

参考文献：

[1] 射频微电子学：第2版[M]. (美) 毕查德.拉扎维(Behazad Razavi), 著.机械工业出版社.2016

[2] CMOS射频集成电路设计：第2版[M]. (美) 托马斯 H.李 (Thomas H.Lee), 著.电子工业出版社.2005