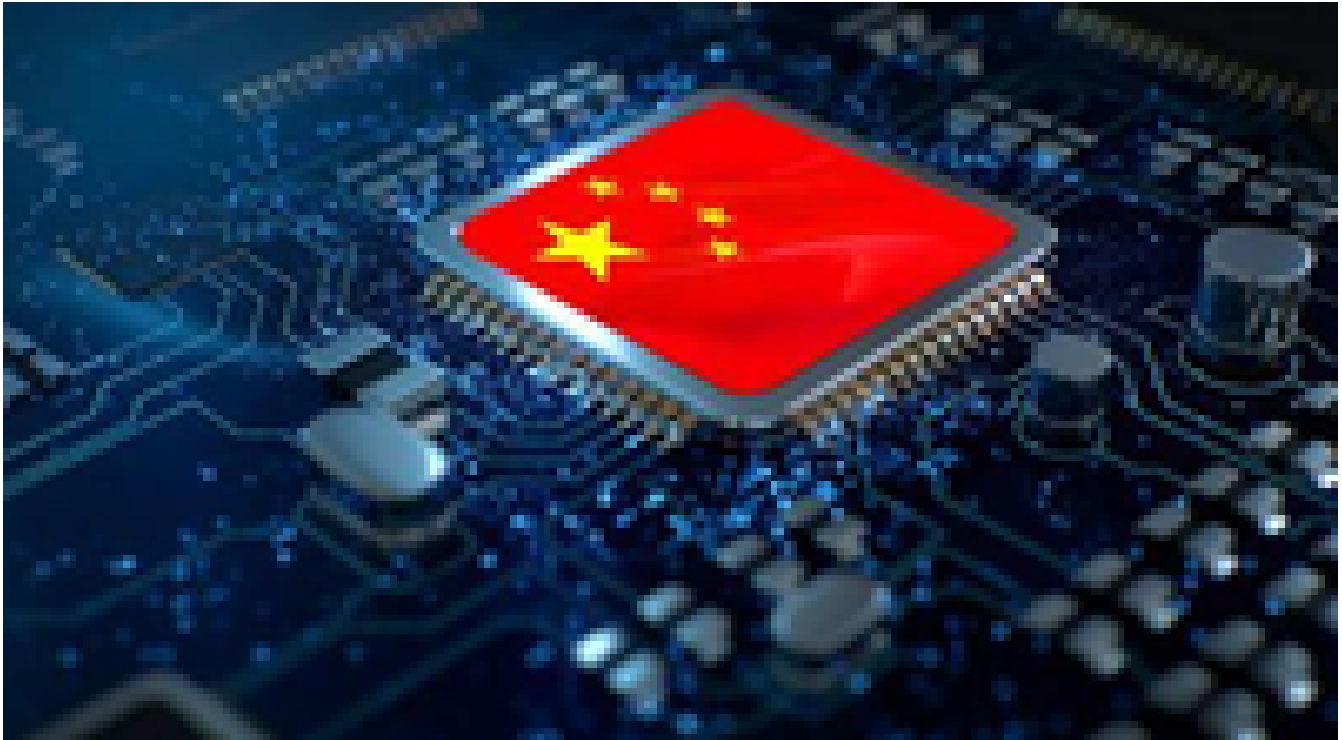


【5G RRU专题】什么是PA非线性失真？



好奇心真是挡不住，某非著名号主竟然拿出了珍藏了几百年的古籍，啃了一下关于DFE的知识。于是忍不住就写了这篇，以飨读者。

首先，介绍一下什么是RRU。Remote Radio Unit，简称RRU，意为射频拉远单元。

射频拉远单元分成**近端机**(即**无线基带控制 (Radio Server)**)和**远端机**(即**射频拉远 (RRU)**)两部分，二者之间通过光纤连接，其接口是基于开放式的CPRI/eCPRI。

无线通信系统使用**射频(RF)**信号在基站和移动用户之间传输数据。射频**功率放大器(PA)**位于发射机内部，是连接基站到移动终端的下行链路的关键部件。功率放大器往往要么是**线性的**，要么是**高效的**，但不是两者都是。幸运的是，如果使用**数字预失真(DPD)**来补偿PA的非线性行为，就可以在数字发射机中使用高效的功率放大器(PA)。因此，我们从以下两个方面，初步认识DPD。

- PA的非线性
- DPD基本原理

在了解DPD之前，先了解一下PA的非线性问题。

在数字信息的射频传输中，将采样的数据序列从数字转换为射频并放大，如图1所示。数字输入用 $x(k)$ 表示，**功放输入端**和**输出端**射频信号分别用 $x_{RF}(t)$ 和 $y_{RF}(t)$ 表示。对于线性系统，基站传输的大部分功率都被限制在一个分配的带宽内，这个带宽被称为信道。然而，工作在**接近饱和状态**下的高效功率放大器表现出一种不希望的非线性行为，产生比分配的信道宽几倍的失真频谱（敲黑板）。这种发射频谱的展宽称为**频谱再生**。

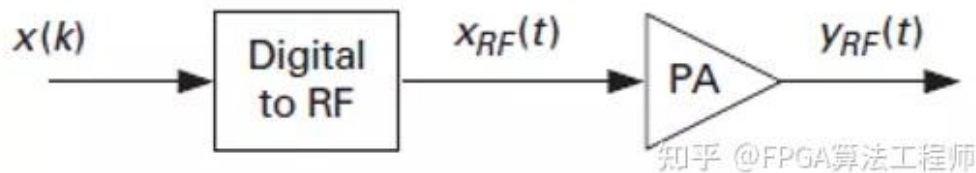


图1 带功放 (PA) 的数字发射机

重点来了：输入信号与PA非线性的相互作用会产生谐波和交调失真(IMD)。谐波是载波频率的多项式函数，而IMD是位于载波频率附近的数字调制的多项式函数。在大多数射频发射机中，在功率放大器之后放置一个滤波器以限制发射带宽。通频带通常跨越多个信道:例如，在宽带码分多址系统(WCDMA)中，发射频带可为60MHz宽，而单个信道为5MHz宽。**因此，只能依靠发射滤波器去除载波频率的谐波，而不能去除信号调制的交调产物。**后者需要使用**线性化方法进行补偿**。一个流行的选择是在**数字基带应用预失真**。

带外和带内失真由与输入信号的调制格式相关的规格来调节。**带外失真**是通过**进入分配信道附近的相邻信道的失真功率来测量的**。这可以被描述为相邻信道的功率或相邻信道的泄漏。相邻信道功率与分配信道功率的比值称为**相邻信道功率比(ACPR)或相邻信道泄漏比(ACLR)**。一般来说，该规范使带外失真成为功率放大器线性度的关键测量指标，特别是对于基于CDMA的调制格式。

带内失真增加了**误差矢量幅度(EVM) (阿西吧)**。**EVM是量化前解调信号与期望数字信号之间的均方根(RMS)差**。在正交频分复用(OFDM)系统中，它是一个关键的测量方法，特别是当单个子载波使用64QAM调制时，它会因功率放大器非线性等缺陷而降低。

为了说明IMD失真，考虑PA对高斯噪声输入信号的响应，高斯噪声输入信号是带限的，以填充分配的信道。输出频谱是线性分量和几种交调模式的和(三阶和五阶IMD如图2所示)。线性分量，也被称为载波信号，保持在分配的信道内，而失真扩展到邻近的信道。IMD带宽随着多项式阶数的增加而增加。然而，很大一部分失真存在于分配的信道内。

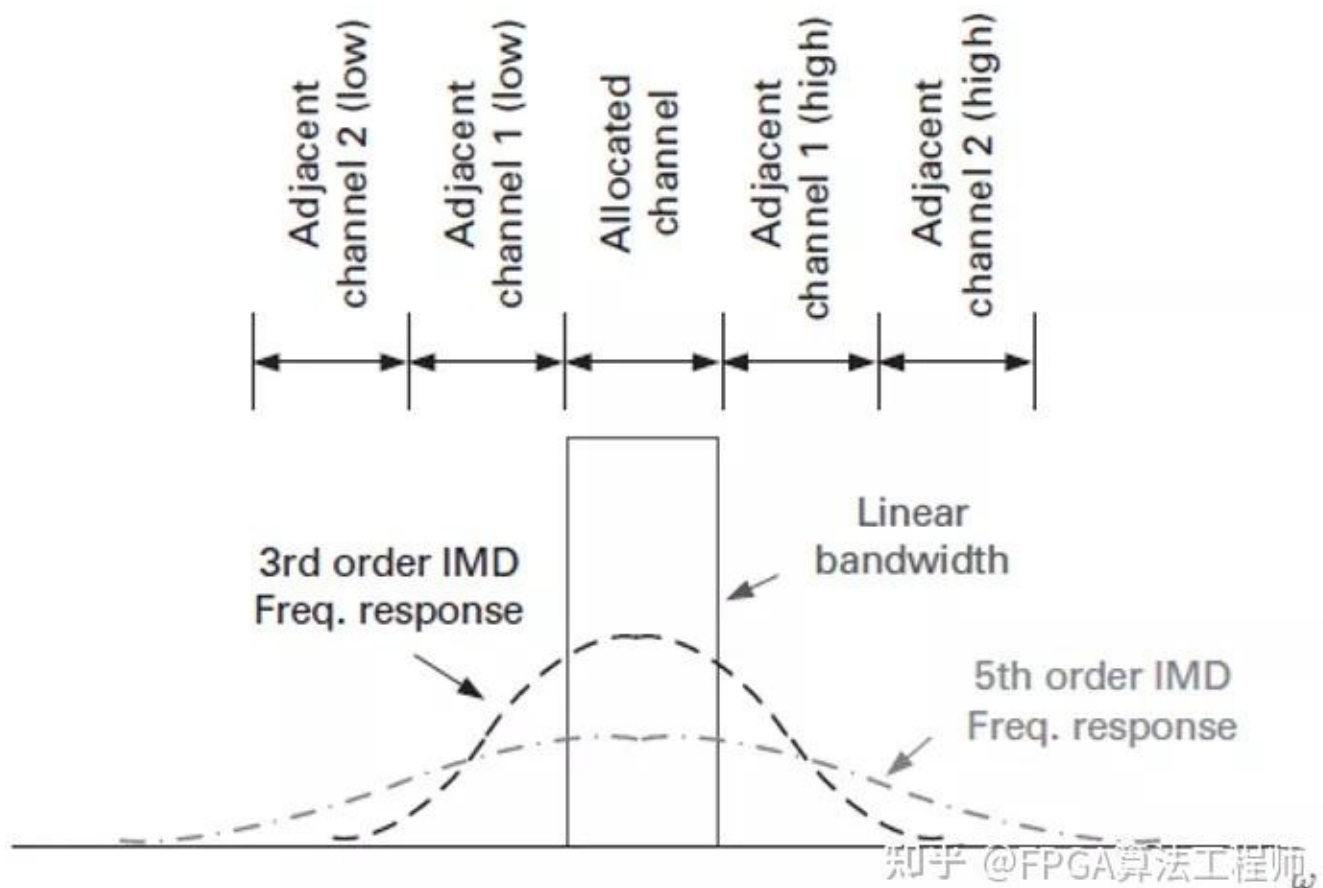


图2 输出频谱包括线性信号分量，以及三阶和五阶交调失真(IMD)

RF发射机可以发射多个占用邻近信道的载波信号。在这种情况下，交调失真包括来自各个载波内部的互调以及载波之间的交调分量。后者的效果是将失真扩展到更大的带宽上，如图3所示。

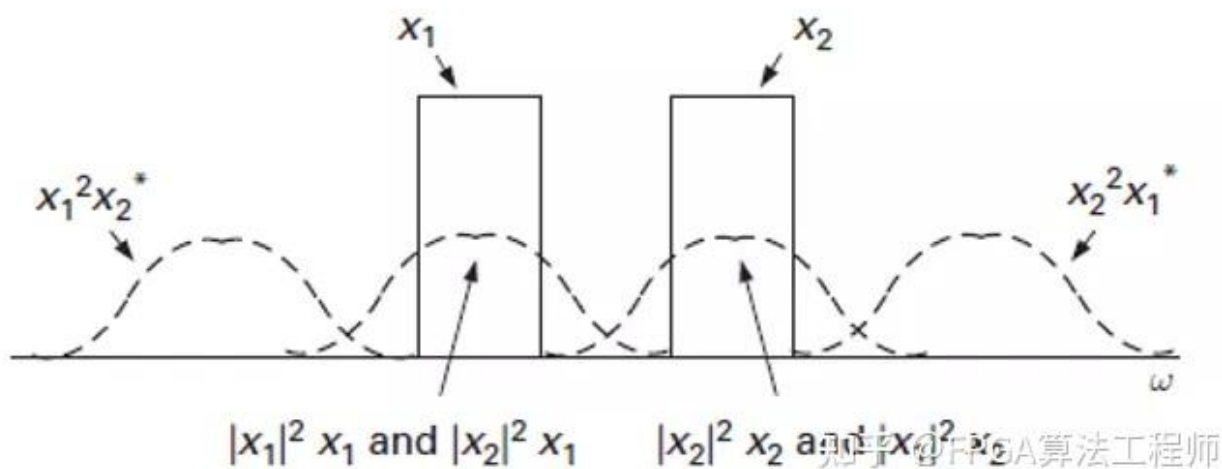


图3 两个载波信号 x_1 和 x_2 的线性和三阶IMD谱

PA非线性可分为无记忆非线性和基于记忆非线性。对于前者，非线性模态仅是瞬时输入的函数。对于后者，非线性模态还受过去输入值的影响。PA存储器改变产生的失真的频率响应，并增加建模IMD所需的系数的数量。功率放大器所表现出的记忆效应对于宽带宽输入信号(如包含多个载波信号的信号)更容易识别。特别是，剧烈的记忆效应在Doherty放大器配置中很常见，这在蜂窝基站中很流行，因为它在接近饱和的功率水平下运行时具有很高的效率。

嗯，遇到算法问题，我们都先摆出一个模型，不管对不对。

PA的输出被建模为输入 $x_{RF}(t)$ 的非线性函数：

$$y_{RF}(t) = F_{PA}\{x_{RF}(t)\}$$

知乎 @FPGA算法工程师

式中 $F_{PA}\{\}$ 是利用可调复系数 b_i 可控制响应的非线性函数。选择PA模型 $F_{PA}\{\}$ 的系数，通常是为了减小实际输出 $y_{RF}(t)$ 和模型 $F_{PA}\{x_{RF}(t)\}$ 输出之间的差异，如图4所示。也就是说，系数选择使期望的平方误差最小化：

$$E[|\epsilon_{RF}(t)|^2] = E[|y_{RF}(t) - F_{PA}\{y_{RF}(t)\}|^2]$$

知乎 @FPGA算法工程师

其中 $E[\]$ 为期望值。什么叫期望值？赶快拿出《概率论与数理统计》翻一下。

请注意，通过功率放大器存在一个标称延迟。它通常使用输入和输出之间非线性映射之外的大延迟进行补偿，如图4所示。

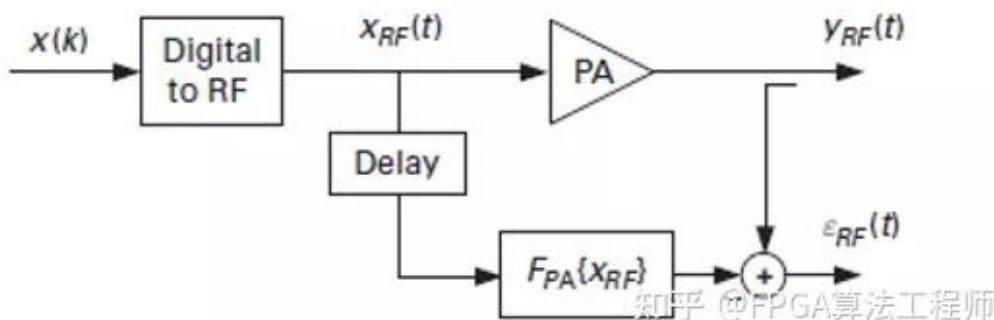


图4 利用射频输入 $x_{RF}(t)$ 的非线性函数对功率放大器的射频输出 $y_{RF}(t)$ 进行建模

在功放模型方面，最简单的是无记忆模型，它是瞬时输入和输出信号的非线性映射。无记忆映射的幅度分量称为功率传递函数。AB类偏置放大器的功率传递函数如图5所示。最显著的特点是饱和功率，这是一个水平线，

额外的输入驱动器将不会增加输出功率。传递函数的线性响应也如图5所示。输出幅度由PA的期望增益归一化，用 G_0 表示，因此线性传递函数具有相同的斜率。

啥？这不是模电的功放知识吗？呜呜呜~

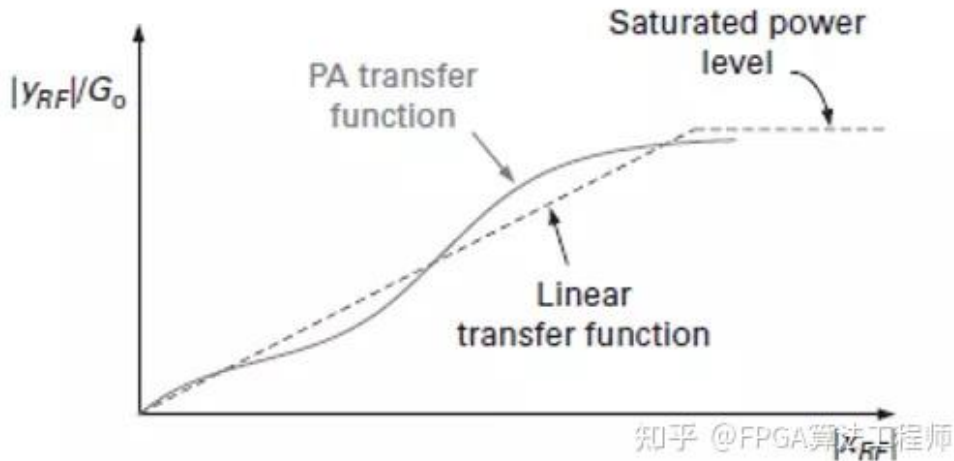


图5 AB类偏置功率放大器的典型功率传递函数和理想的线性传递函数

功率放大器的无记忆非线性也可以通过指定复增益作为输入信号包络 $|x_{RF}|$ 的函数来建模。PA的输出变成：

$$y_{RF}(t) = G_{PA}(|x_{RF}|) \cdot x_{PA}(t)$$

其中 $G_{PA}(|x_{RF}|)$ 表示PA的复增益。增益的幅值和相位分量称为AM-AM和AM-PM曲线。由于输入信号中的幅度调制(AM)导致功率放大器增益的幅度和相位调制(AM和PM)，这些曲线因此得名。AB类偏置放大器的AM-AM和AM-PM曲线分别如图6和7所示。AM-AM和AM-PM曲线的线性响应在整个输入包络范围内是恒定的，即 $|x_{RF}|$ 。

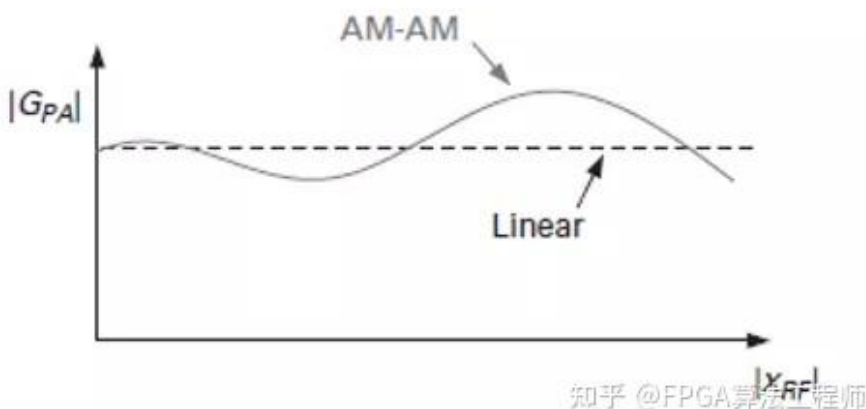


图6 AB类偏置功率放大器的AM-AM曲线

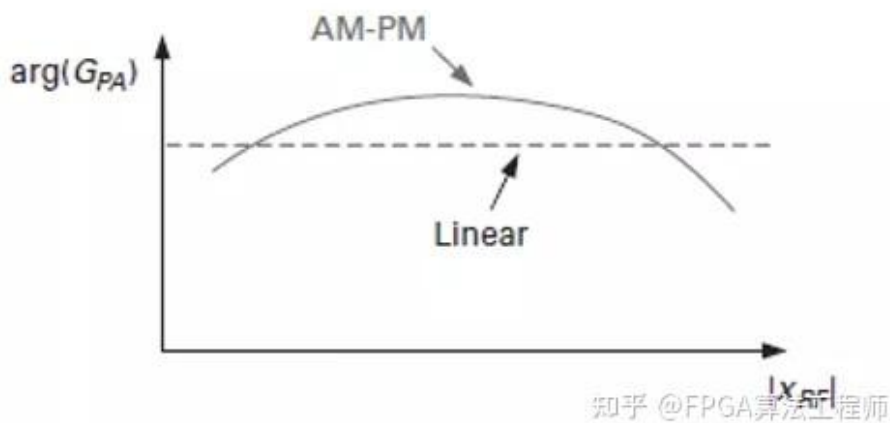


图7 用于AB类偏置功率放大器的AM-PM曲线

可以通过对输入和输出的RF信号进行采样，计算增益($G_{PA}=y_{RF}/x_{RF}$)，并在各自的图上标记每个坐标位置 ($|x_{RF}|$, $|G_{PA}|$)或($|x_{RF}|$, $\arg\{G_{PA}\}$)来构建AM-AM和AM-PM曲线，如图8和图9所示。无记忆曲线表示采样增益的平均值，其中用于平均的积分窗口跨越水平轴 $|x_{RF}|$ (RF输入包络线)的一个小区间。

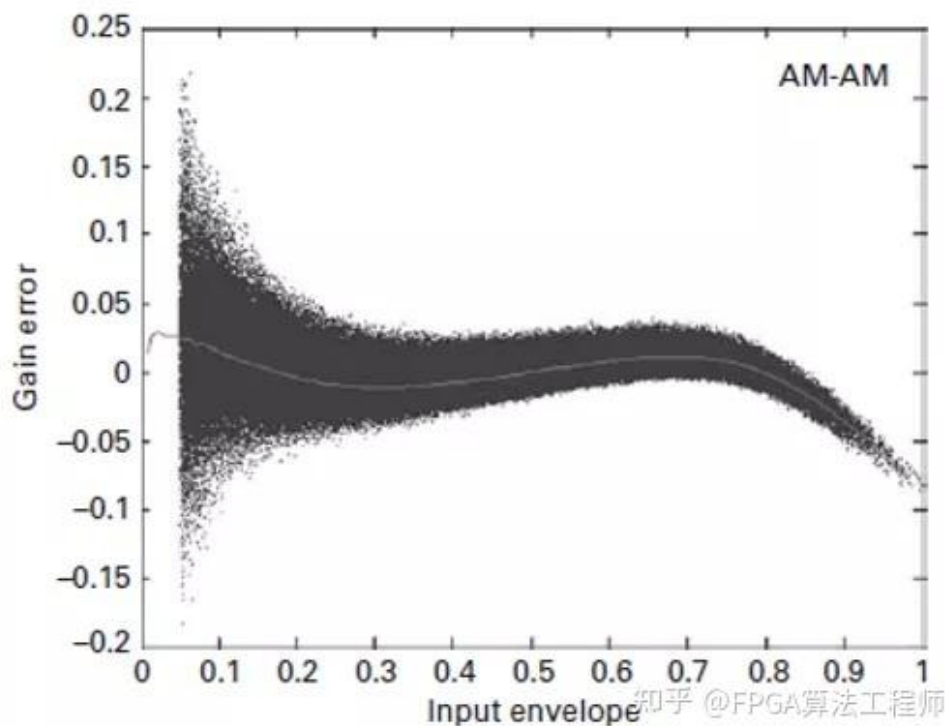


图8 测量增益幅度和估计AM-AM曲线。AM-AM曲线是测量增益幅度的平均值

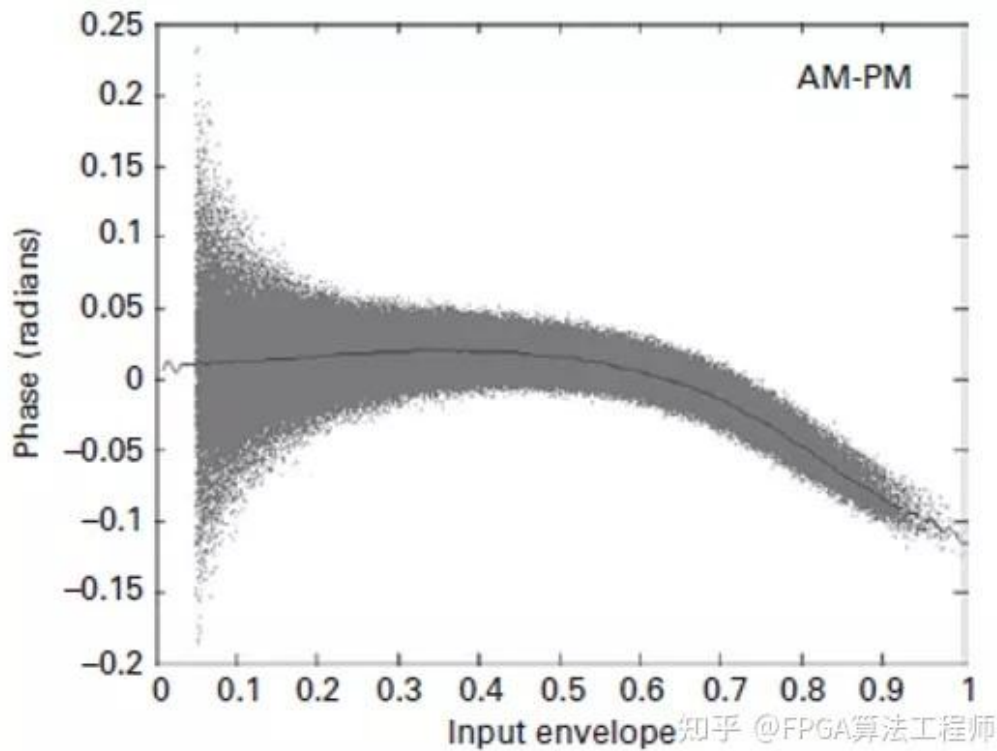


图9 测量相位和估计AM-PM曲线。AM-PM曲线是测量相位的平均值

功率放大器内的记忆可以通过在无记忆非线性块前后进行滤波和在其周围进行反馈来建模，如图10所示。每个滤波器都引入了与频率相关的行为。然而，由于非线性块的存在和乘法块与非线性交换的事实，它们需要单独考虑。当非线性或记忆适中时，只使用一个滤波器块的简化记忆模型通常可以成功地使用。

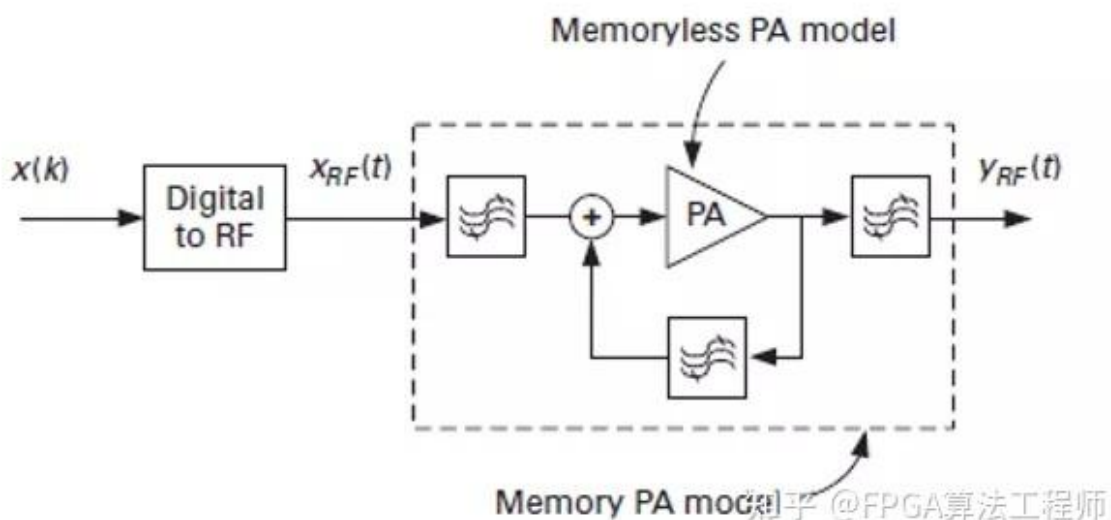


图10 功率放大器的记忆模型

非线性记忆也可以由一个不需要的增益调制引起，它是现在和过去包络值的函数。这部分是由于与偏置网络中电流相关的时间常数。与热效应相关的较慢的增益变化可能是由于平均输入功率和时间常数的变化与晶体管周

围热下沉的热耗散有关。

无记忆和记忆功率放大器模型捕获了由输入信号包络 $|x_{RF}(t)|$ 的变化引起的影响。功率放大器的行为也受到缓慢变化的条件的影响，如环境温度、载波频率、使用的载波数量和调制方式。

对于特定的工况，非线性模型是有效的。虽然可以创建一个功率放大器的大模型来计算所有可能的工作条件，但在实践中并没有这样做。在大多数情况下，非线性模型尽可能简单，以满足给定工作条件下所需的精度，并根据需要在由操作条件定义的多维空间中创建新的模型。

很明显，**非线性可以被建模为输入输出映射或功率放大器增益的变化。**为PA选择的模型通常也用于预失真函数。对于后者，它允许线性化问题被定义为增益调节，这是一个在自适应控制理论领域中研究得很好的问题。所有可用的控制理论和自适应技术可以用来进行高性能、鲁棒线性化设计。功率放大器线性化的增益调节观点要求输出信号的输入和线性分量在它们自己的模块中进行时间对齐和均衡，而不是DPD模块。

输入输出映射模型是比较流行的，因为它允许预失真被视为逆映射。在大多数情况下，逆映射是通过测量输出到输入的映射直接得到的。这是一个美妙的静态预失真设计基于详尽的离线实验测量。不幸的是，逆映射中的这种简单性具有误导性，因为它没有承认使用**最小均方(LMS)**估计技术的实时自适应系统的许多困难。

啪，关于PA的非线性问题，先到这里啦。懂了吗？没懂。那好，下一次，我们讲讲DPD的基本原理，拟合PA的非线性问题。

---END---

更多关于FPGA、算法内容，不想错过，可关注微信公众号【FPGA算法工程师】。