

如何实现实用且有效的数字预失真解决方案

Steve Summerfield, 算法实现总监

Frank Kearney, 系统架构总监

摘要

根据许多推广材料对数字预失真(DPD)的介绍, 其性能是基于静态定量数据。通常, 这些材料会显示DPD频谱并引用邻道泄漏比(ACLR)数字。这种方法虽然解决了基本需求, 但却没有抓住实际部署中出现的诸多挑战、风险和性能权衡。向5G的快速过渡带来了大量新的挑战 and 场景, 算法开发人员和设备供应商需要给予更多关注。要支撑静态性能, 必须具备在有许多元素处于变化状态的复杂环境中保持性能和稳定性的能力。

简介

在理想世界中, 功率放大器的输出是输入的比例放大, 除此之外与输入完全相同, 放大器使用的大部分功率贡献在输出信号中。因此, 其效率最大且没有失真。但现实世界却并非如此: 实际的线性放大器的效率往往非常差。例如, 电缆分配系统中使用的放大器具有优异的线性度, 但这是以效率为代价来实现的。在大多数情况下, 效率勉强能超过6%, 其余功率(94%)则被浪费。浪费的功率涉及经济、环境和应用方面的成本。在蜂窝基站中, 电力成本占运营成本(OPEX)的50%以上。浪费的功率会增加电力使用并产生温室气体, 而未作为无线电波发射出去的大部分功率必须作为热量消散, 需要主动和被动的热管理。

在过去的数十年间, 蜂窝行业已将PA的效率提升至超过50%的性能水平。这是通过采用智能架构(如Doherty)和高级工艺技术(如GaN)而实现的。获得效率的同时也付出了一定的代价——线性度。在蜂窝系统中, 线性度很差有两个主要后果: 带内失真和带外辐射。带内失真会破坏所发射信号的保真度, 可以通过误差矢量调制(EVM)性能的降幅来表示。带外辐射会打破3GPP辐射屏蔽, 可能对占用邻道频率分配的运营商造成不希望的干

扰。我们通常用ACLR来衡量这方面的性能。除此之外, GaN PA带来了额外的挑战, 因为它的电荷捕获效应也会产生带内失真, 而这些失真是动态的, 与ACLR隐含的SNR无关。

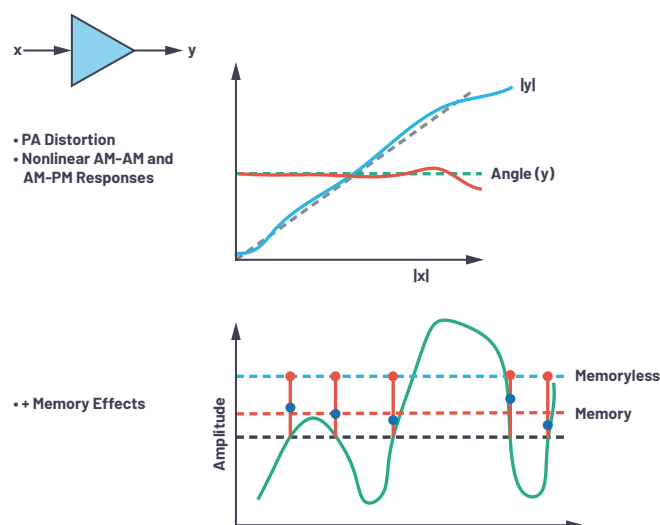


图1. 具有记忆效应的PA动态转换函数

校正PA非线性至关重要。如果知道PA的转换函数, 则对数据运用其反函数将能消除非线性, 这是一个合理的假设。然而, PA的转换函数是动态转换函数, 其输出至输入特性可以被认为处于连续变化之中。此外, 该动态转换函数与一系列PA特性(包括电源、电压和温度)、提供给PA的输入信号以及PA已处理的先前信号(记忆效应)有关。PA的动态非线性行为需要先建模, 然后才能校正, 因此需要数字预失真(DPD), 而DPD需要适应环境的动态变化。

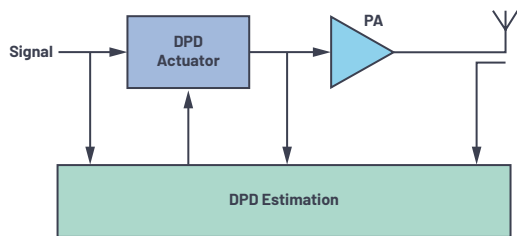


图 2. 数字预失真系统的概念表示

图2显示了许多DPD系统的核心元素：观测、估算和驱动。图2中的概念生成了一个跟踪PA预期响应的模型，这样便可产生适当的抵消信号来消除预测的PA非线性行为。模型有很多，例如十分普遍的广义记忆多项式(GMP)。

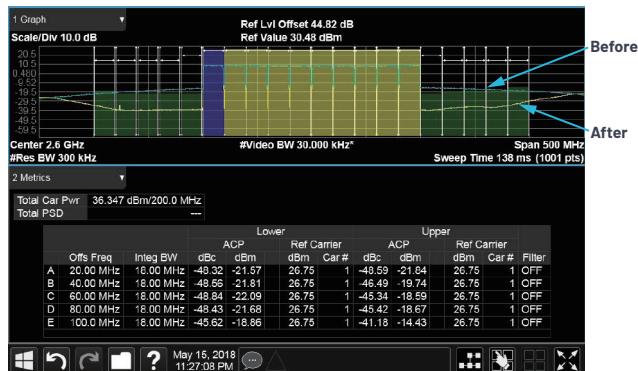


图 3. 有和无数字预失真两种情况下的邻道泄漏

在线性区域中工作的PA产生的带外失真较少，而且泄漏到相邻通道的噪声明显降低，如图3所示。图3显示了典型DPD测试台上的频谱分析仪的屏幕截图，该测试台用来演示静态DPD性能是否达到许多ACLR合规性测试所要求的标准。

市场演变、性能增强和移动目标

自20世纪90年代以来，DPD便已在蜂窝基站中商用，部署量超过800万台。蜂窝市场的技术和代次需求不断变化（2G、3G、4G，现在是5G），对DPD的要求也在与时俱进。这些挑战包括但不限于：更宽的带宽、更高的功率、载波数量、更高的峰均比，以及更多的基站数量和密集化。

设备供应商急于差异化其产品，不断增强效率方面（相对于相关3GPP规范）的性能，其中PA效率仍然是挑战。驱动变革的传统因素是运营成本和热管理（包括与之相关的硬件/重量成本），但现在，环境考虑加速了这种变化。

PA和DPD具有某种共生关系。在有些情况下，这种关系很和谐，但在另一些情况下，这种关系很棘手。与某家供应商的DPD友好相处的PA，可能与另一家供应商的DPD水火不容。通常，当DPD和PA经配置和调整与特定应用匹配时，性能最优。然而，

为了满足5G及后续技术的激进要求，PA设计在不断发展。因此，DPD也必须不断演进以满足额外的需求。随着宽带和双频应用成为常态，PA开发人员面临着在更高频率下实现更宽带宽，同时满足性能期望的挑战。开发带宽能力为200 MHz及以上的PA是一个挑战，同时要确保其也能满足3GPP规范和效率，这带来了进一步的挑战。这些挑战最终都落在DPD开发人员肩上。

了解挑战

量化DPD性能不是一项简单的任务。有许多情况和场景需要考虑——除PA外，还有其他一些影响因素。考虑性能时，需要清楚地定义测试条件的细节：在200 MHz的带宽实现>50%的效率比在20 MHz的工作带宽实现相同效率的挑战要大得多。当考虑所分配频谱内的载波放置时，情况变得更加复杂：它可能是连续的信号，也可能是分段的载波分配，即部分频谱被占用。

在较高层次上，DPD性能有几个定量指标——主要由3GPP规范或运营商要求所定义的数据点：ACLR、EVM和效率。满足这些要求仅仅是DPD性能冰山的一角。将稳定性和鲁棒性添加到需求矩阵中后，挑战之巨大开始显现。DPD性能有两个关键方面：静态基准性能和实际的运行动态性能。

为了刻画动态特性的挑战，图4显示了动态环境中的信号演变，并展示了ACLR如何用连续适应的DPD加以响应。图中的数字是名义上的。曲线提供了信号突然变化的影响的例子，虽然极端但合法。随着信号变化，DPD模型要适应变化。适应事件用点表示。在信号变化与下一自适应之间的过渡时间中，模型和信号存在不匹配，因此ACLR值可能上升，在瞬态期间内超过辐射规范的风险会增加。

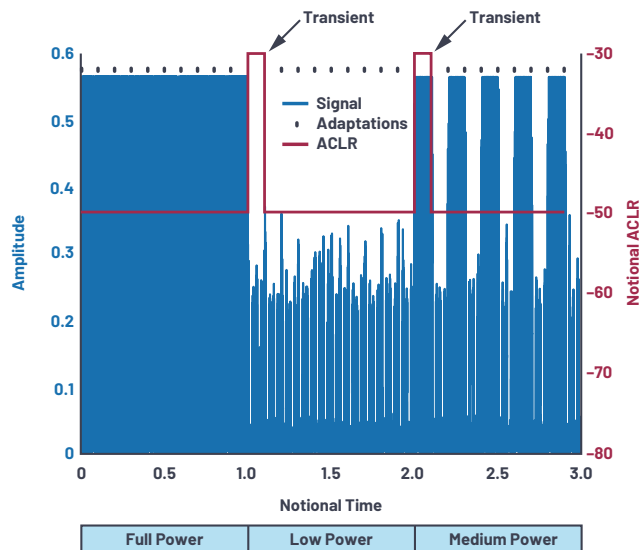


图 4. 动态单元加载、DPD适应和ACLR瞬态

适应需要一定的时间，因此始终存在瞬态。高性能DPD的挑战在于将该模型不匹配时间减少到最小，同时确保两个状态之间平滑过渡。需要管理该过程，使得适应速度和对ACLR的中断均得到考虑。重要的是要了解模型不匹配与信号转换的性质的相关性。当不匹配度很高时，DPD存在性能降低的风险，更糟糕的是无线电的稳定性降低。如果发生不稳定，DPD算法可能会像滚雪球一样失控，打破辐射屏蔽，在最坏情况下可能损坏无线电硬件。在性能和稳定性的跷跷板上，稳定性始终是更重要的设计考虑因素。DPD设计必须鲁棒，确保在正常和异常工作条件下都能保持稳定，并能从错误中恢复。

高性能实用DPD解决方案的挑战可以概括为如下要求：

- ▶ 静态性能（合规性测试或BTS流量负载接近恒定）
 - ACLR
 - EVM（包括作为特例的GaN）
- ▶ 动态特性
- ▶ 鲁棒性

此外，由于ADI公司是DPD的第三方供应商，因此还必须考虑以下因素：

- ▶ 维护
 - 我们的客户(OEM)将产品交付给其客户（运营商）之后，解决现场出现的性能问题。
- ▶ 进化
 - 在现场使用期间，PA技术和信号空间应用可能改变。
- ▶ 泛化
 - OEM可以针对每个产品精细调整DPD。我们没有这种奢侈资源。我们必须满足许多应用的需求，同时使配置性和冗余最小化。

提升DPD性能以应对挑战

仅考虑静态性能的话，DPD开发有一个线性渐进的因素。如果提供更多资源，我们就能提高性能。例如，更多GMP系数有助于更准确地模拟PA行为。因此，随着带宽加宽，这成为维持（如果不能改进）性能的一种策略。然而，这种方法有其局限性，最终会达到一个收益递减点——投入更多资源却不产生收益或收益很少。DPD算法开发人员需要采取更多创造性方法来实现进一步增强。ADI公司的办法是用更一般的基础函数和更高阶Volterra产品来补充基本算法的广义记忆多项式。开发人员试图创建一个能准确预测PA行为的模型，因此数据累积和数据操纵是核心基本要素。在连续时间和功率水平下捕获数据，开发人员便有更全面的手段来进行评估和塑造模型行为。图5是采用这种方法的系统的概念图。请注意，更广泛的数据捕获/观测节点与数字

电源监控耦合。电源监控有助于动态运行。先前存储的模型可以通过多种方式发挥作用，以减轻上面讨论的动态瞬变。

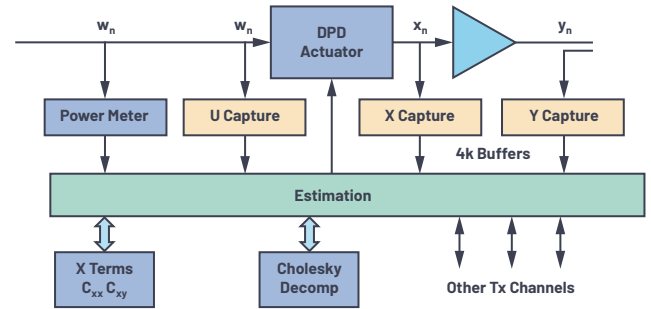


图5. 使用更广泛的捕获 / 观测实现 DPD

近年来，GaN PA技术为DPD开发人员带来了新的挑战：长期记忆效应。GaN工艺技术在效率、带宽和工作频率方面具备许多特有的优势。然而，它存在所谓的电荷捕获效应。GaN的电荷捕获是一种长期记忆效应，先有捕获，然后是热解除捕获。基于GMP的DPD纠正了一些误差，但仍有残余误差会继续影响信号质量。这种失真引起EVM的相应升高。图6提供了该现象的图形表示。注意PA增益波动和这些波动的时间性。另请注意捕获和解除捕获状态，解除捕获发生在较低功率符号上。

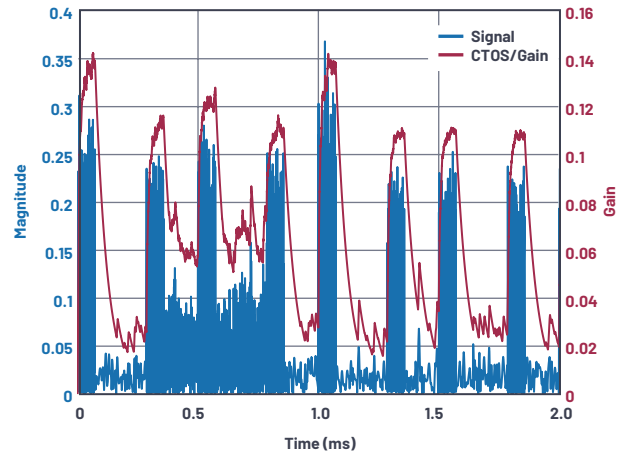


图6. GaN PA 电荷捕获引入的长期增益误差

时间效应是长期的，传统方法意味着要采集大量的样本点，因而需要存储和处理大量数据。存储器成本、硅片面积和处理成本使得这种方法不是商业DPD部署的可行选择。DPD开发人员必须以有利于高效实现和运行的方式消除电荷捕获的影响。电荷捕获校正(CTC)是我们的ADRV9029收发器支持的一项特性，其功耗和计算时间成本均很低。已经证明，EVM能恢复到EVM 3GPP规范内的水平。下一代收发器（即将到来的ADRV9040）拥有更精密的解决方案，预计它能在动态场景中提供增强的性能，并能更好地覆盖数量越来越多、电荷捕获特性各不相同的GaN PA应用。

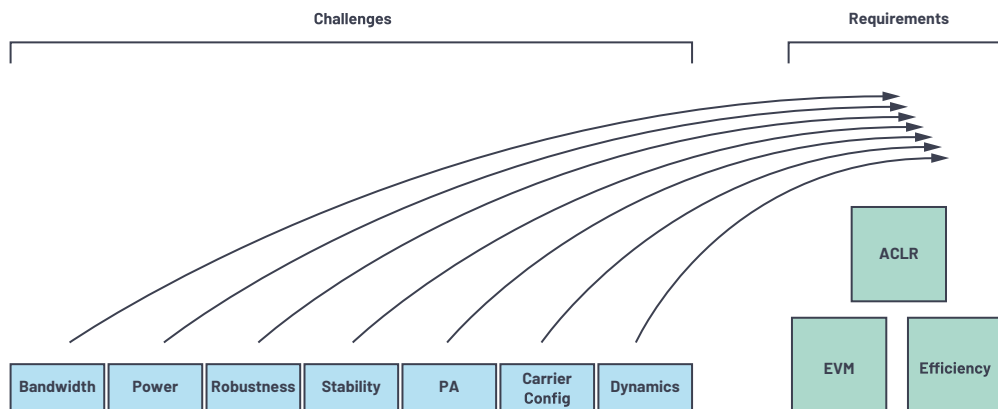


图 7. 平衡 DPD 性能的所有要素和挑战

如上所述，DPD实现的稳定性至关重要。鲁棒性通过不断监测内部状态并提供对异常状况的快速响应来实现。

ADI解决方案的泛化通过测试许多供应商的广泛PA样片来实现，我们同很多供应商建立了共生的技术关系。

结论

介绍DPD性能时，重点往往是性能的静态方面。虽然EVM和ACLR的衡量标准仍然有效，但必须更多地关注限定这些测量的运行条件和要求的组合。5G NR的需求继续推动应用要求的提高，再加上对更高PA效率的渴望，导致DPD算法开发的挑战进一步加大。

当我们开始评判DPD性能时，我们需要一个整体方法来处理：

- ▶ 静态性能
- ▶ 动态性能
- ▶ 鲁棒性
- ▶ 稳定性

勉强符合规范的DPD可能不受欢迎，会造成暂时不合规范的情况出现的DPD可能令运营商不安。更灾难性的是，DPD会变得不稳定并导致非法辐射和PA的失效。不应将DPD算法视为现成的东西。根据PA和应用的具体情况调整DPD才能实现优化性能，但算法敏捷性和开发/现场支持也是重要的考虑因素。有效的DPD算法可以给系统带来相当大的好处。不应低估需求和性能评估的复杂性。



作者简介

Steve Summerfield是ADI公司领导无线基础设施应用的算法和架构开发的总监。他于2017年加入ADI，此前在多家电信和半导体公司担任过高级职位。Steve之前长期在大学任职。他著述颇丰，持有多项专利，并拥有理论物理学博士学位。联系方式：steve.summerfield@analog.com。



作者简介

Frank Kearney于1988年毕业后即加入ADI公司。在工作期间，他担任过多种工程和管理职位。他目前在无线系统部门管理一个由架构师和算法开发人员组成的团队。该部门重点关注O-RAN无线电架构的发射路径效率和系统级增强功能。Frank拥有都柏林大学博士学位。联系方式：frank.kearney@analog.com。

