

超宽带数字预失真：在电缆分配系统中实现带来的优势（功率和性能）和挑战

作者：Patrick Pratt和Frank Kearney



简介

电缆系统于20世纪50年代初在美国首次问世。即使技术和分配方式在迅速发生变化，电缆作为数据分配通道却始终保持着重要地位。新技术在现有电缆网络上已实现分层。本文重点介绍这一技术演进的其中一方面——功率放大器 (PA) 数字预失真 (DPD)。这是许多从事蜂窝系统网络研发工作的人士将会熟悉的一个术语。将该技术迁移到电缆能够带来明显的功效和性能提升，同时也带来了巨大的挑战。本文深入探究其中的一些挑战并概述相应的解决方案。

了解要求

功率放大器在非线性区域工作时，其输出将失真。这一失真可能会影响带内性能，还可能导致无用信号溢出到邻道。溢出效应在无线蜂窝应用中特别重要，因此对邻道泄漏比 (ACLR) 有严格的规范和限制。突出的控制技术之一是在信号到达功率放大器之前对其进行数字整形或预失真，从而消除功率放大器中的非线性。

电缆环境则完全不同。首先，可将其视为封闭环境。电缆中发生的情况不会扩展到电缆外！运营商拥有并控制整个频谱。带外 (OOB) 失真并不是关注重点，带内失真才是至关重要的。服务提供商必须确保最高质量的带内传输通道，以便能够利用最大的数据吞吐量。其中一个方法是使电缆功率放大器严格运行在线性区域内。采用这种工作模式的代价是功效极差。

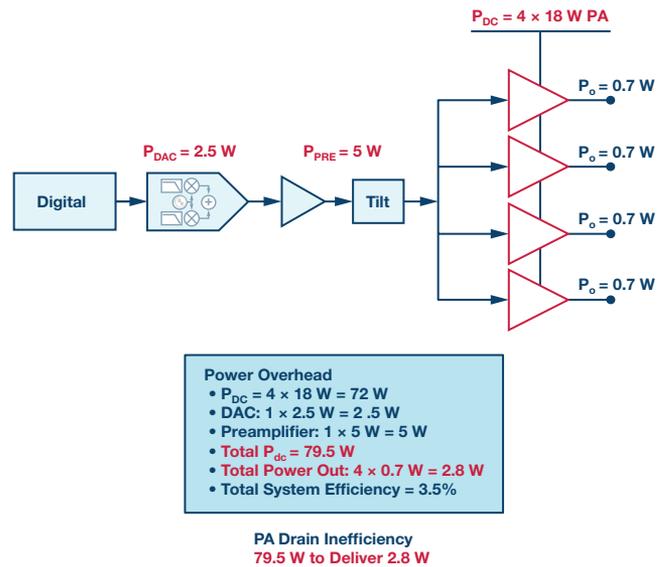


图1. 电缆功率放大器驱动器的功效。

图1概要显示了典型的电缆应用。尽管该系统功耗近80 W，但仅传送了2.8W信号功率。功率放大器是功效极低的A类架构。最大瞬时峰值效率可以计算为50%（当信号包络最大时，假定为电感负载）。如果功率放大器完全在线性区域工作，则考虑电缆信号的极高峰均比（通常为14 dB）意味着放大器需要比信号压缩开始时平均低14 dB的工作条件，从而确保即使在信号的峰值处也不会发生信号压缩。回退与放大器工作效率直接相关。当放大器回退14 dB以适应各种电缆信号时，工作效率将降低 $10^{-14/10}$ 。因此，工作效率从理论上的最大值50%降低到 $10^{-14/10} \times 50\% = 2\%$ 。图2概要显示了上述情况。

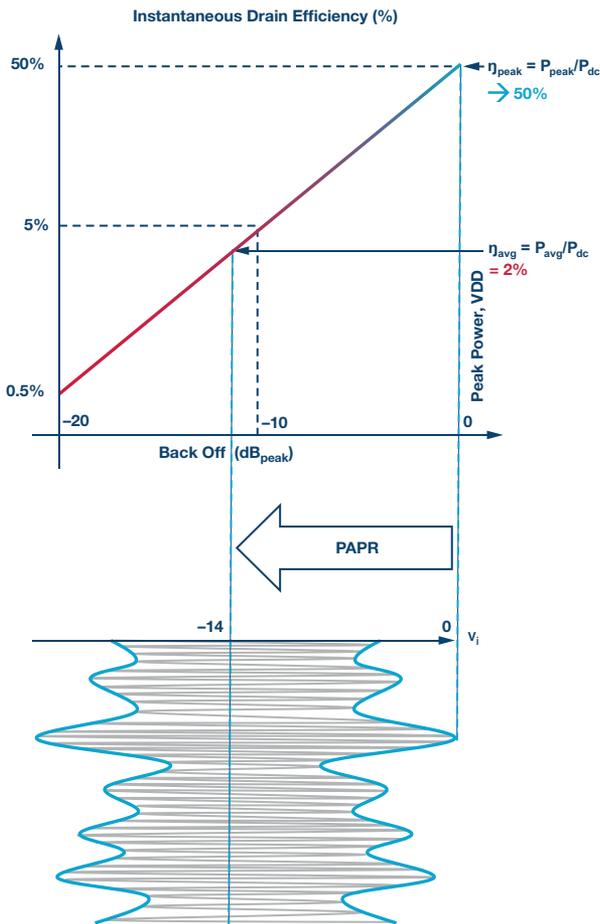


图2. 高峰均比推动回退工作模式并使效率大幅降低。

总而言之，功效是主要问题。损失功率会影响成本，但同样重要的是，它还消耗了电缆分配系统中的稀缺资源。电缆运营商增加了更多功能和服务，因此需要进行更多的处理，而处理所需的功率可能会受现有功率预算的限制。如果能从低效功率放大器中设法获取浪费的功耗，那么可以将其重新分配给这些新功能。

针对功率放大器低效提出的解决方案是数字预失真。这是整个无线蜂窝行业普遍采用的一种方法。数字预失真允许用户在更高效但非线性更明显的区域中运行功率放大器，然后先预先校正数字域中的失真，再将数据发送到功率放大器。数字预失真的本质是在数据到达功率放大器之前对其进行整形，以抵消功率放大器产生的失真，从而扩大功率放大器的线性范围，如图3所示。这一扩大后的线性范围可用于支持更高质量的处理，提供较低的调制误差率 (MER)，¹或者允许功率放大器以更低偏置设置运行，从而节省功耗。尽管数字预失真已广泛应用于无线蜂窝基础设施，但在电缆环境中实施数字预失真具有独特而又有挑战性的要求。

如图4所示，电缆应用的实际工作效率约为3.5%！实施数字预失真可以降低系统的功率要求，由原来的80 W降低到61 W，节约19 W，节电率达到24%。每个功率放大器以前的功率要求为17.5 W，现在则下降到12.8 W。

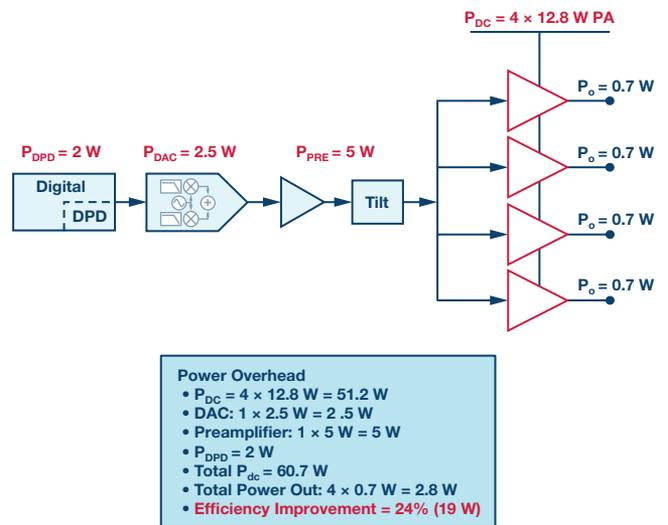


图4. 通过数字预失真方案实现节能概述。

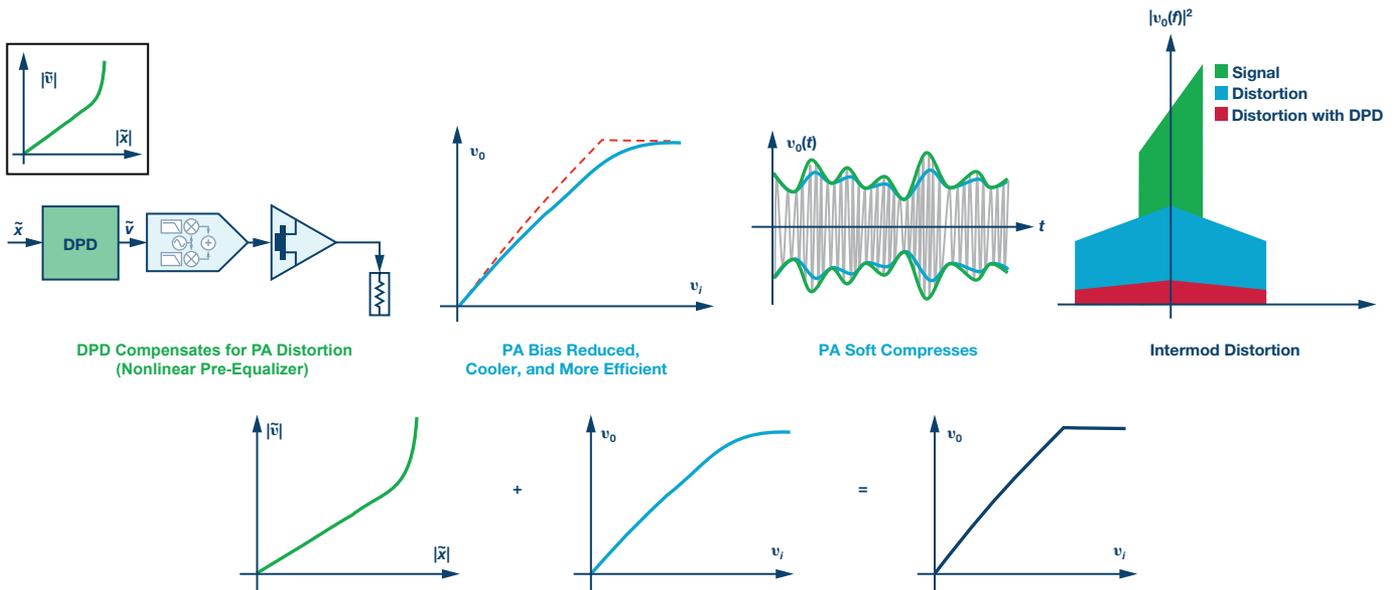


图3. 数字预失真概述。

实施挑战

数字预失真的价值不言而喻，但在电缆应用中实施时会面对许多独特挑战。因此，必须在现有资源范围内应对这些技术挑战。例如，解决方案本身必须是高效节能的，因为如果节省的电能转化为该解决方案的电源，则在优化功率放大器效率方面没有什么价值。同样地，数字处理资源需要适当，以便可以高效地驻留在当前的FPGA架构中。具有非标准硬件要求和广泛架构变化的超大型/复杂算法不太可能适应。

超宽带宽

电缆应用环境与无线蜂窝环境之间最显著的区别也许是操作带宽。在电缆中，约1.2 GHz的带宽要进行线性化。宽带宽挑战复杂的原因在于频谱从直流开始仅为54 MHz且信号带宽大于信道中心频率。必须牢记的是，功率放大器经驱动进入非线性工作区域后即可实现省电，这样虽然提高了效率，但代价是非线性产物也随之而来。数字预失真必须消除由功率放大器产生的非线性，尤其是那些折回带内的非线性成分。这就在电缆应用中构成了独特挑战。

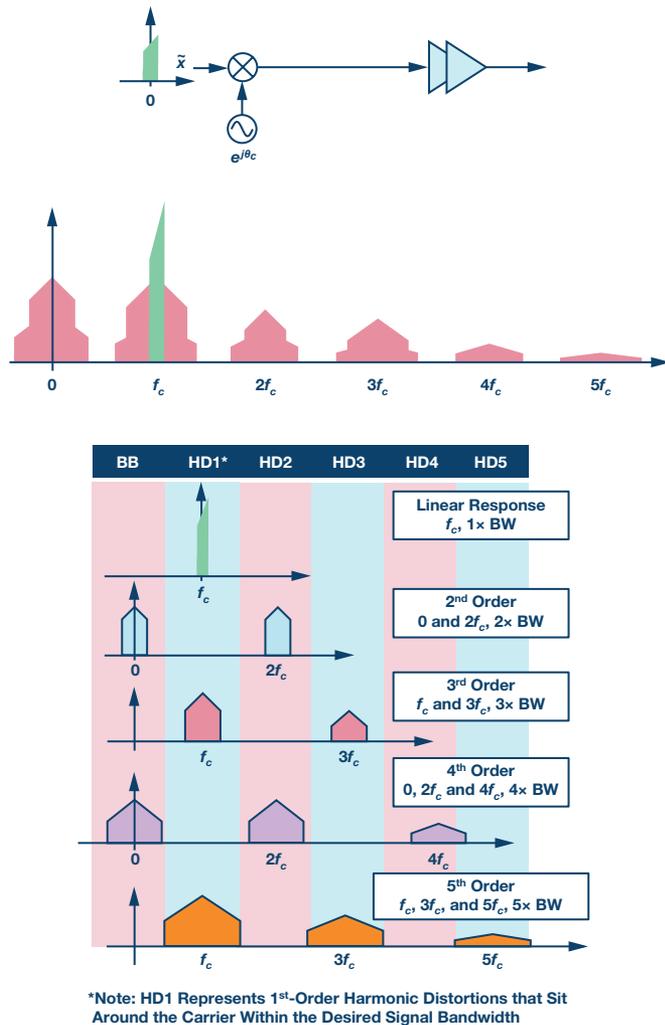


图5. 传统窄带中谐波失真项的说明。

图5概要显示了我们可能期望的经过非线性放大级的传统窄带（本节稍后部分给出窄带的定义）上变频基带信号的宽带谐波失真项。非线性功率放大器输出通常通过幂级数表达式描述，比如具有以下形式的Volterra级数：

$$y(n) = \sum_{m_1=0}^M \dots \sum_{m_k=0}^M h_{k,m_1 \dots m_k} \prod_{q=1}^k x(n-m_q)$$

可将其理解为有记忆效应的Taylor幂级数的推广。值得注意的是，每个非线性项 ($k = 1, 2, \dots, K$) 都会产生多个谐波失真 (HD) 产物。例如，五阶有3个谐波项：一次谐波、三次谐波和五次谐波。另外需要注意的是，谐波带宽是其阶次的倍数。例如，三阶谐波项的宽度是激励带宽的3倍。

在电缆中，谐波在频谱（从直流开始仅为54 MHz）上的位置对数字预失真构成了特殊挑战，而这一挑战与大信号带宽的关系并不大。所有非线性系统都会发生谐波失真。电缆数字预失真的重点是落在带内的谐波失真。从图5可以看出，在传统窄带应用中，重点将是三阶谐波和五阶谐波。尽管形成了其他谐波，但它们在目标频带外，可通过传统滤波消除。我们可以按照分数带宽来定义宽带应用和窄带应用，其中分数带宽的定义公式如下：

$$\frac{(f_n - f_l)}{f_c}$$

(f_n = 最高频率, f_l = 最低频率, f_c = 中心频率)。分数带宽超过1时，可将应用视为宽带应用。大多数蜂窝应用的分数带宽不超过0.5。因此，它们的谐波失真行为符合图6所示的特性。

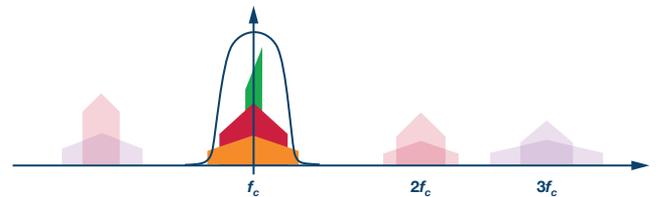


图6. 窄带简化；只需考虑一次谐波周围的产物。

对于这样的窄带系统，只有一次谐波周围的带内失真需要通过数字预失真消除，因为采用带通滤波器可去除所有其他产物。另外还需注意的是，由于带内没有偶数阶产物，数字预失真只需处理奇数阶项。

在电缆应用中，我们近似认为 $f_n \sim 1200$ MHz, $f_l \sim 50$ MHz, $f_c \sim 575$ MHz, 从而得出分数带宽为2。要确定需要校正的最低谐波失真阶次，可以使用以下公式：

$$f_l K_{min} < f_n$$

(K_{min} 是要考虑的最低非线性阶次)，或者用数字表示就是 $50 \text{ MHz} \times 2 = 100 \text{ MHz}$ ，由于其小于1200 MHz，因此二阶谐波失真正好在工作频带内并且必须被校正。因此，如果决定在安全性和线性度极高的操作范围之外操作电缆功率放大器，则所得到的谐波失真将如图7所示。

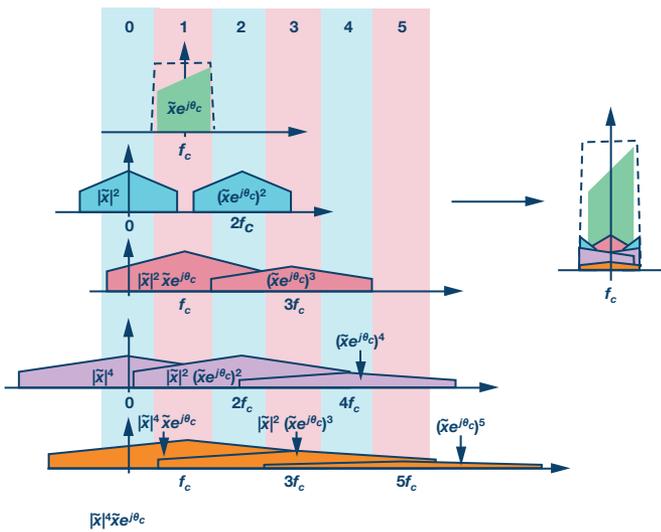


图7. 宽带电缆应用中宽带谐波失真的影响

相比只需要考虑奇数阶谐波的无线蜂窝应用，电缆应用中的偶数阶项和奇数阶项均在频带内，可产生多个重叠的失真区域。这在一定程度上会对任何数字预失真解决方案的复杂性和精密性产生严重影响，因为算法必须通过简单的窄带假设。数字预失真解决方案必须适应谐波失真每个阶次的项。

在窄带系统中，偶数阶项可以被忽略，奇数阶在每个目标频带内产生1个项。电缆应用中的数字预失真必须考虑奇数阶和偶数阶谐波失真，并且还必须考虑到每个阶可能有多个重叠的带内元素。

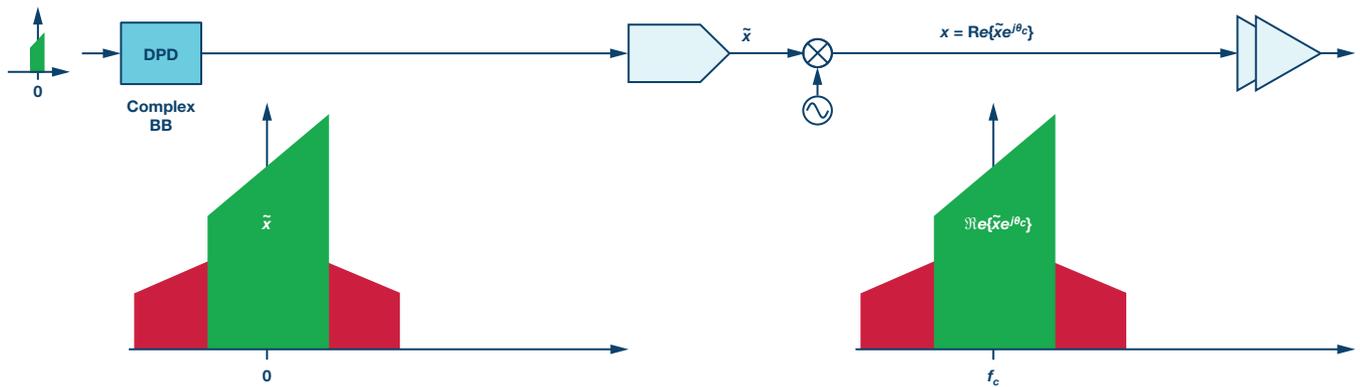
谐波失真校正定位

考虑到传统窄带数字预失真解决方案的处理在复杂的基带处完成，我们主要关注对称位于载波周围的谐波失真。在宽带电缆系统中，尽管保持了位于一次谐波周围的那些项的对称性，但是这一对称性不再适用于更高阶次的谐波产物。

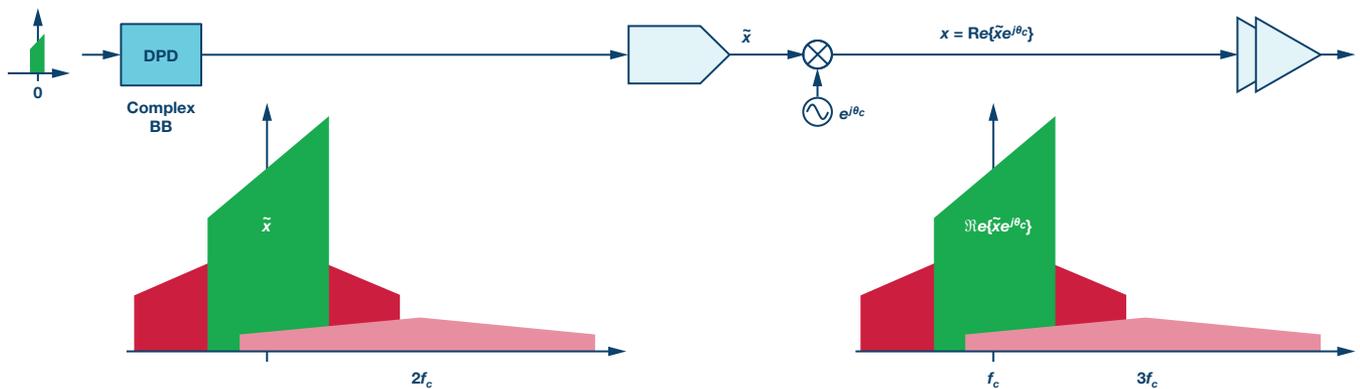
如图8所示，传统窄带数字预失真在复杂基带处完成。在这些实例中，仅一次谐波产物在频带范围内，因此其基带产物直接转换为RF。考虑宽带电缆数字预失真时，较高阶次的谐波失真必须是频率偏移，才能使上变频后的基带产物正确位于实际RF频谱中。

环路带宽限制：

闭环数字预失真系统采用传输和观测路径。在理想化的模型中，两条路径都不会受到带宽限制，并且两者的宽度都足以通过所有数字预失真项。也就是说，它们足以通过带内项和带外项。



(a) Conventional Narrow-Band DPD Processing Done at Complex Baseband.



(b) Wideband Cable DPD, OOB HD Must be Frequency Offset to Allow for RF Upconversion.

图8. 宽带数字预失真复杂基带处理中频率偏移要求的注解。

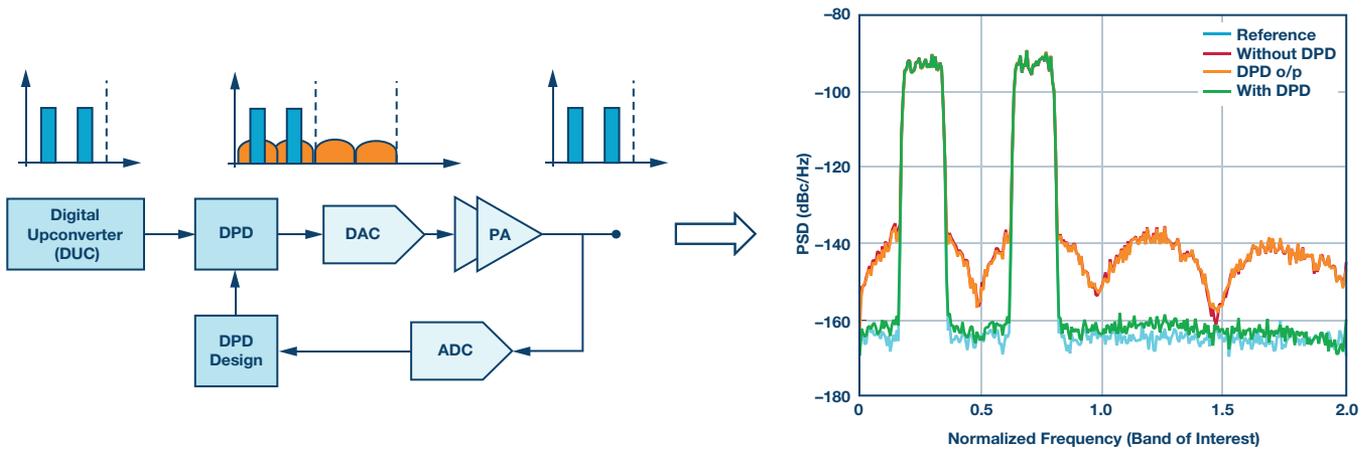


图9. 无带宽限制的理想化数字预失真方案。

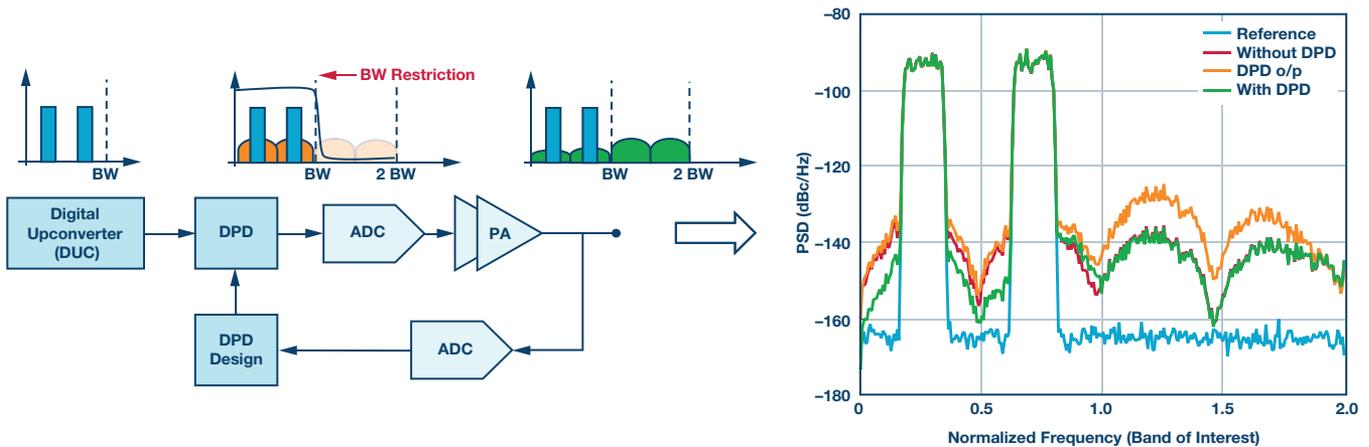


图10. 数字预失真性能由于信号路径中的带宽限制限制了带外项而下降。

图9概要显示了数字预失真一种数字预失真的实现。在理想情况下，从数字上变频器 (DUC) (通过数字预失真) 到DAC乃至通过功率放大器的路径将没有带宽限制。同样地，观测路径上的ADC将对全带宽进行数字化 (请注意，为了进行说明，我们展示2倍带宽的信号路径。在某些无线蜂窝应用中，可扩展到3至5倍的带宽)。理想方案是通过数字预失真产生带内项和带外项，从而完全消除功率放大器引入的失真。需要注意的是，为了准确消除失真，需要在目标信号的带宽之外创建项，这一点非常重要。

在实际方案中，信号路径具有带宽限制，数字预失真性能无法达到理想方案要求。

在电缆应用中，带宽限制可能有多种来源：FPGA与DAC之间的JESD链路、DAC镜像抑制滤波器、功率放大器输入匹配。这些限制最显著的影响是带外性能。从图10所示的仿真可以看出，数字预失真无法校正带外失真。在电缆中，带外失真会造成带内性能下降，这一点特别重要，是我们需要考虑到的。信号路径中的带宽限制可以并且的确会影响带内性能。

电缆环境比较独特，因为运营商拥有整个频谱。感兴趣频带 (54 MHz 至1218 MHz) 外的辐射位于未被他人使用的一段频谱中，也会由于高频时固有的电缆损耗而导致衰减。观测路径只需监测工作频带内发生的情况。

在这里需要做出一个重要区分：带外辐射无需考虑，在带外生成并延伸到频带内的辐射需要考虑。因此，尽管带外辐射无需考虑，但需要考虑形成这些辐射的项。该方案与无线蜂窝应用大为不同，因为其观测带宽要求通常为工作频带的3至5倍。电缆中的重点是带内性能，因此仅需考虑带外项对带内性能的影响。

电缆数字预失真只需要针对带内产物进行校正：对于DOCSIS 3，频率范围为54 MHz至1218 MHz。数字预失真生成二次，三次，...，消除项。尽管只需在电缆带宽上进行校正，但在数字预失真致动器中，这些项将会扩展到更宽的带宽 (例如，三阶带宽扩展到1218 MHz的3倍)。为了保持传统数字预失真自适应算法的稳定性，应当将这些带外项保留在环路周围。对数字预失真项进行的任何滤波往往会造成自适应算法不稳定。在电缆系统中存在频带限制，因此常规算法可能失效。

数字预失真和电缆倾斜补偿

与所有其他传输介质一样，电缆引入了衰减。通常认为这种衰减与电缆质量、电缆敷设距离和传输频率有关。如果要在电缆的接收端，即工作频谱上实现相对均匀的信号接收强度，则必须在发送端增加预加重（倾斜）。倾斜可被视为电缆的反向传递函数。它采用与传输频率成比例的预加重或整形。

通过被称为倾斜补偿器（位于功率放大器之前）的低功耗无源模拟均衡器即可实现整形。在高频下衰减少或不衰减，而在低频下衰减大。倾斜补偿器输出端的信号在整个工作频谱范围内可具有高达22 dB的均衡增益变化。

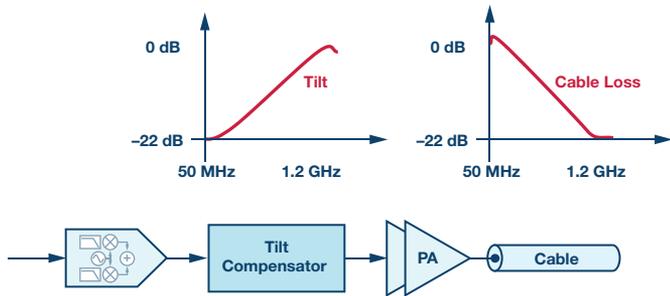


图11. 倾斜补偿器方案

倾斜补偿器对信号进行整形，并且在通过功率放大器处理信号时保持整形轮廓。传统数字预失真方案会将整形视为减损并尝试针对其进行校正，因为数字预失真是（非线性）均衡器。似乎合理的是，如果将倾斜的倒数添加到观测路径中，就可以减轻其影响。但事实并非如此。功率放大器是非线性的，因此交换性不适用，也就是说：

$$PA \{T\} \neq T\{PA\}$$

(PA代表功率放大器，T代表倾斜补偿器)。

为了实现最佳操作，数字预失真处理模块需要了解在功率放大器输入端处显示的信号。在电缆数字预失真应用中，利用数字预失真算法为功率放大器建模的同时，必须保持倾斜补偿。这就面临一些非常独特和极具难度的挑战。我们需要一个稳定的低成本解决方案，不会使倾斜均衡。虽然无法在本文中披露该解决方案的性质，但ADI已经找到了一个创新的解决方案，将在未来的出版物中详细介绍。

数字预失真和电缆功率放大器架构

如图4所示，典型的电缆应用将把一个DAC的输出分成四路并提供给四个独立的功率放大器。为了最大程度节省功率，需要在所有这些功率放大器上实施数字预失真。可行的解决方案可能是实施四个独立的数字预失真模块和DAC模块。该解决方案有效，但会使效率降低，系统实施成本增加。额外的硬件需要资金和功率成本。

并非所有功率放大器都是一样的，尽管工艺匹配（制造过程中）可以提供具有相似个性的单元，但差异仍会存在，并且随着老化、温度和供电波动而变大。然而，将一个功率放大器用作主机并为其开发优化的数字预失真，然后将其应用于其他功率放大器，确实可提供系统性能优势，如图12中的仿真结果所示。

左侧的曲线表示未采用数字预失真情况下的功率放大器性能。非线性工作模式导致失真，这体现在MER¹性能（范围为37 dBc至42 dBc）中。闭环数字预失真应用于观测主功率放大器的输出；曲线图右侧的绿色曲线表示的是增强性能。数字预失真已针对功率放大器失真进行了校正，结果是总体性能经过转变后可提供65 dBc到67 dBc的MER。图中间剩余的曲线表示的是从功率放大器的性能，即根据主功率放大器进行校正的功率放大器。可以看出，只观测一个功率放大器来实施闭环数字预失真可使所有功率放大器的性能受益。然而，从功率放大器仍然存在会失效的工作点。从功率放大器的性能范围从38 dBc到67 dBc。宽范围本身不是问题，但该范围的一部分低于可接受的工作阈值（电缆通常为45 dBc）。

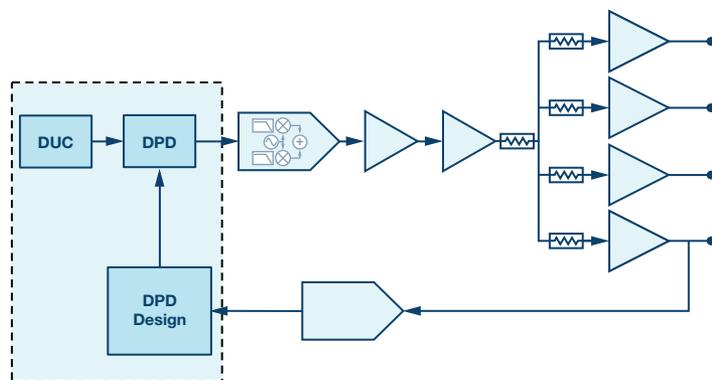
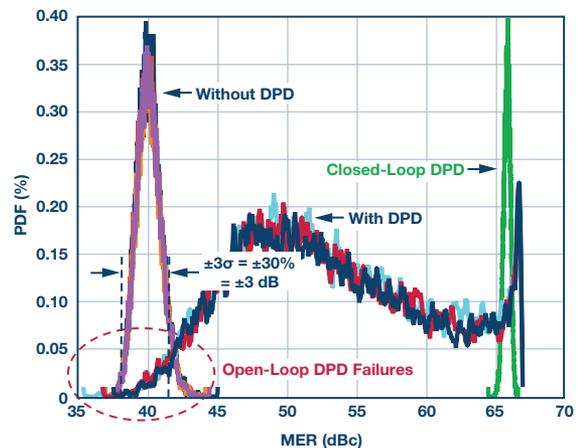


图12. 使用多个功率放大器的单次数字预失真（仿真结果）。



电缆中独特的系统架构为数字预失真提供了额外挑战。优化性能需要采用闭环数字预失真方案。但根据惯性思维,在电缆中这样做将需要在每个功率放大器路径中附加硬件。最佳解决方案需要为每个功率放大器提供闭环数字预失真的增强功能,但不需要额外的硬件成本。

利用SMART算法解决挑战

如本文之前所述,电缆数字预失真为设计人员带来了非常独特和极具难度的挑战。如果在功率和硬件的限制范围内解决这些挑战,那么优势就不会被削弱;如果把功率放大器中节省下来的功率用于额外的DAC或FPGA,则对于功率放大器省电几乎没有任何价值。同样地,省电必须与硬件成本平衡。ADI通过结合高性能模拟信号处理与先进算法方案解决了该挑战。

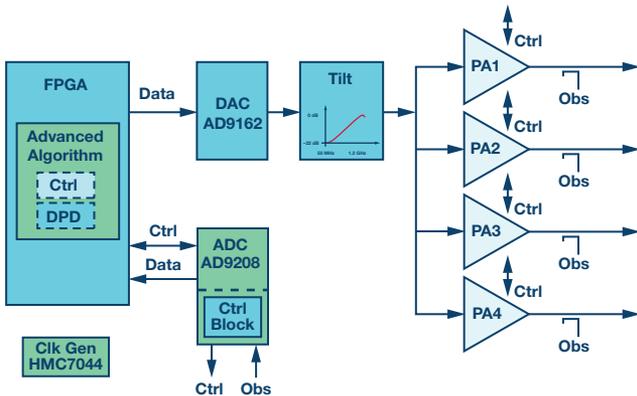


图13. 使用高级转换器和SMART算法的电缆数字预失真方案

ADI方案的高级概述如图13所示。该解决方案可以被认为具有三个关键要素:使用高级转换器和定时产品、采用支持全面信号链监控/控制的架构、运用可利用已有知识实现最佳性能的数字预失真先进算法。

该算法是该解决方案的核心。它使用其广泛的信号处理知识以及信号路径的传递功能来形成输出,同时调整信号路径某些方面的动态控制。动态系统解决方案不仅意味着系统设计人员能够大幅省电,而且这些节省的电可以转化为性能提升。利用该算

法,用户定义了系统必须运行的MER¹性能级别后,就会实施系统调整,以便在所有输出端实现该性能。需要注意的是,该算法还确保在保持每个功率放大器的最佳用效率的同时满足性能阈值,这一点非常重要。功率放大器的功耗都低于实现目标性能所需的功耗。

前面概述了该解决方案的实施。该算法本身的特性是ADI专有IP,这不在本文论述范围内。SMART算法具有学习系统路径的能力,然后改变通过路径传输的数据的性质以及路径本身的特性以提供最佳结果。我们将最佳结果定义为:维持MER质量的同时降低功率要求。

路径特性以及传输信号的性质都在不断变化。该算法具有处理动态适应性的自学习能力。更重要的是,适应发生在系统运行期间,不会使传输的流中断或失真。

结论

电缆环境仍旧是提供数据服务的重要基础设施。随着技术继续发展,对频谱和功效的要求也越来越高。新一代技术的发展使需求日益增长,并推动实现更高阶的调制方案以及更好的功效。这些增强功能的到来必须不影响系统性能(MER),尽管数字预失真提供了一个可能的实现途径,但其在电缆应用中的实施构成了非常独特和极具难度的挑战。ADI已开发出一套全面的系统解决方案来应对这些挑战。该解决方案涵盖基于硅的芯片(DAC、ADC和时钟)、功率放大器控制以及先进算法。所有这三种技术的结合为用户提供了一个适应性强的解决方案,在这些解决方案中,他们可以轻松地以最小的妥协来达到功率与性能要求。该软件定义解决方案还支持原有电缆技术到新一代电缆技术的轻松过渡,新一代电缆技术中预计将包含全双工(FD)和包络跟踪(ET)。

注释1: 调制误差率是对调制质量的度量。它表示目标符号向量与传输符号向量之间的差异。 $MER = 10\text{Log}(\text{平均信号功率}/\text{平均误差功率})$ 。它可以被认为是对补偿放大器内符号位置准确性的度量。

Patrick Pratt [patrick.pratt@analog.com]是一名高级研究员,负责ADI公司电缆数字预失真算法的开发。他的职业生涯超过30年,其中包括在私人组织和学术机构从事的算法研究和开发活动。帕特里克拥有科克理工学院电子工程专业的博士学位。



Patrick Pratt

Frank Kearney [frank.kearney@analog.com]担任ADI公司利默里克通信系统工程团队的算法开发经理。他自1988年毕业后即在ADI公司工作。他不久前从中国返回;在中国工作期间,他担任亚太地区系统工程团队的高级应用经理。他目前是都柏林大学的博士生。



Frank Kearney

该作者的其它文章:

基站中的无源交调(PIM)效应:了解挑战和解决方案
第51卷,第1期