



功放数字预失真线性化技术发展趋势与挑战

刘昕, 陈文华*, 吴汇波, 冯正和

清华大学电子工程系, 北京 100084

* 通信作者. E-mail: chenwh@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2021-12-18; 修回日期: 2022-01-21; 接受日期: 2022-02-14; 网络出版日期: 2022-04-02

国家自然科学基金 (批准号: 61941103) 和北京信息科学与技术国家研究中心资助

摘要 射频功率放大器是发射机的核心器件之一, 它在提供高效率的同时也成为了发射机非线性失真的主要来源. 因此, 发射机往往采用额外的功放线性化技术以兼顾效率和线性度, 其中, 数字预失真技术以其高精度、稳定、可灵活配置等优势成为目前应用最广泛、应用效果最好的一类线性化技术. 本文从数字预失真的基本原理和关键技术出发, 回顾了数字预失真技术近三十年的发展历程, 探讨了目前数字预失真发展面临的关键技术挑战, 为今后的研究提供了参考.

关键词 无线通信, 射频功率放大器, 数字预失真, 行为建模, 发展趋势

1 引言

射频功率放大器是发射机中最耗能的设备之一, 它的效率、功率、增益等指标在决定发射机性能和成本方面起关键作用, 因此, 射频功放电路设计及相关技术研究一直以来都是学术界和产业界的热点问题. 作为典型的非线性器件, 功放面临效率和线性度的矛盾: 一方面, 功放工作在高效率区时产生严重的非线性失真, 增大解调信号的误码率并造成带外频谱泄漏, 干扰邻道通信用户; 另一方面, 保证线性度则意味着高回退, 功放效率和输出功率下降, 带来成本和散热两大问题. 因此, 传统功放研究着力于在效率和线性度指标之间建立平衡, 目前业界普遍解决方案是采用额外的线性化技术补偿功放的非线性失真, 从而保证功放工作在高效率区.

功放线性化技术的研究由来已久. 传统的线性化技术包括前馈技术 (feedforward)、反馈技术 (feedback)、模拟预失真技术 (analog predistortion) 等^[1], 均采用在模拟域通过电路设计对功放失真进行补偿的思路. 前馈技术的原理框图如图 1(a) 所示, 它将功放原始输入信号分为两路, 一路通过功放正常放大, 另一路与增益归一化后的功放输出信号相减得到误差信号, 误差信号经放大后与功放输出信号相减, 最终得到线性化的功放输出信号. 前馈技术线性化性能好、补偿带宽大, 是一种比较成熟的线性

引用格式: 刘昕, 陈文华, 吴汇波, 等. 功放数字预失真线性化技术发展趋势与挑战. 中国科学: 信息科学, 2022, 52: 569–595, doi: 10.1360/SSI-2021-0421
Liu X, Chen W H, Wu H B, et al. Digital predistortion: development trends and key techniques (in Chinese). Sci Sin Inform, 2022, 52: 569–595, doi: 10.1360/SSI-2021-0421

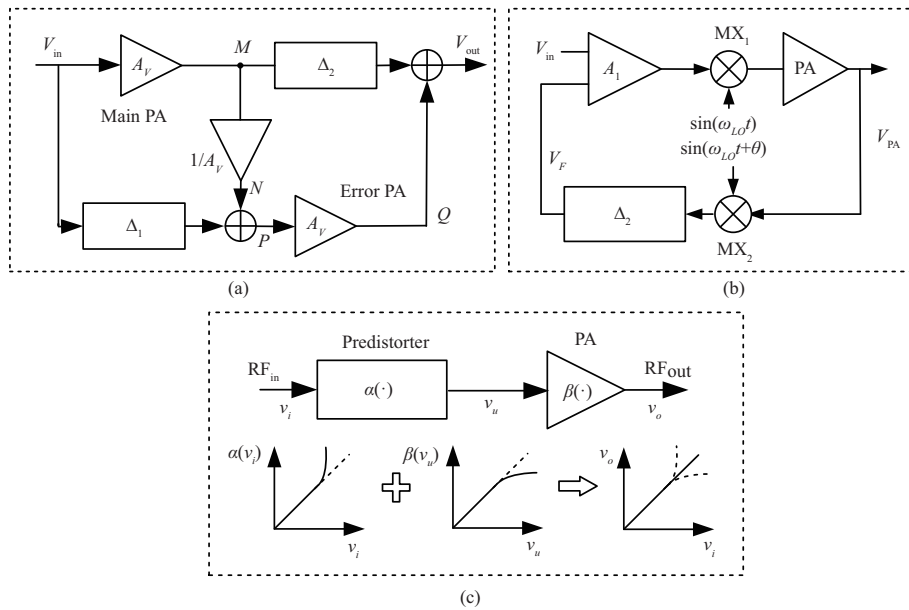


图 1 传统功放线性化技术框图. (a) 前馈技术; (b) 反馈技术; (c) 模拟预失真技术

Figure 1 Block diagram of traditional power amplifier linearization technology. (a) Feedforward technology; (b) feedback technology; (c) analog predistortion technology

化技术, 在第二代通信 (2G) 系统中得到广泛应用. 然而, 该技术需要额外的误差放大器, 硬件复杂度很高, 并且面临复杂的电路参数校准、高精度时延对齐等问题, 其效率较低, 最好情况下效率也低于 20% [2]. 反馈技术牺牲放大器增益换取线性度的提高, 其原理图如图 1(b) 所示. 与前馈技术相比, 反馈技术的线性化性能和成本都较低, 然而由于反馈回路存在寄生、时延等不理想因素, 该方案补偿带宽窄且稳定性较差. 模拟预失真技术通过在功放前配置一个与其非线性特性相逆的预失真器件以补偿功放的失真, 原理图如图 1(c) 所示. 模拟预失真器硬件成本较低, 结构简单易于配置, 然而其线性化性能较差, 且存在与功放之间的“一对一”强适配性, 较难转移配置.

在 20 世纪末, 无线通信系统正在经历从模拟到数字的变革, 通信系统使用的信号以窄带恒包络信号为主, 功放架构也多为传统的单管功放 (如 class-A, class-B, class-AB), 这些模拟线性化技术完全能够满足系统的线性度要求. 然而, 进入 21 世纪之后, 随着无线通信技术的发展, 人们对通信的需求不仅局限于语音通话, 更多的数据业务加入到了通信活动中. 为了获得足够的数据容量和系统效率, 发射机架构、模块器件设计、信号制式等通信系统的各个部分都迎来了剧烈的变革. 第三、四代通信 (3G, 4G) 系统采用高阶正交调制 (multiple quadrature amplitude modulation, M-QAM)、扩频编码、正交频分复用 (orthogonal frequency division multiplexing, OFDM) 等技术提高频谱效率和通信质量, 通信信号由窄带恒包络信号逐步变为宽带非恒包络信号, 传统的功放线性化技术面临了应用瓶颈.

一方面, 非恒包络信号的峰均比 (peak-to-average power ratio, PAPR) 显著提高 (约 5~10 dB), 为了满足发射信号的线性度要求, 功放需要工作在功率回退区, 导致传统单管功放的工作效率明显下降. 这一背景下, 功放效率增强技术及一些高效功放架构受到了业界广泛的研究与关注, 如 class-E、class-F [3~5]、包络跟踪技术 [6]、outphasing 技术 [7,8] 等. 这些新兴功放架构能够提供比传统 class-AB 类功放更高的效率, 同时也带来了更为复杂的非线性失真特性. 此外, 具有高回退效率的架构也成为这一阶段最受欢迎的功放架构, 其中 Doherty 技术由于回退效率高、较容易实现等优点, 已广泛应用

于宏基站发射机中^[9~12]. Doherty 功放基于负载调制原理, 在低功率区时仅主功放启动, 而在高功率区时主辅功放协同工作, 这使得其增益压缩和相位失真情况更为复杂, 传统线性化技术难以补偿其非线性失真.

另一方面, 为了提高传输信号速率, 3G, 4G 系统通信信号带宽显著增加, 从 KHz 量级迅速提高至 MHz 甚至百 MHz 量级 (3G: 5~20 MHz, 4G: 10~100 MHz). 由于功放匹配网络和偏置网络中储能器件的作用, 功放系统具有明显的频谱选择性, 在宽带信号激励下, 功放的输出信号不仅和当前输入信号有关, 还受过去一段时间内输入信号的影响^[13]. 这种现象被称为记忆效应^[14, 15], 表现为功放的输入幅度-输出幅度 (AM-AM) 和输入幅度-输出相位 (AM-PM) 特征曲线不在为单一曲线, 而具有发散特性. 传统的模拟线性化技术难以补偿记忆效应, 这是限制其在发射机中应用的另一个重要因素.

在现代通信系统中, 功放线性化技术也面临变革. 数字预失真技术 (digital predistortion, DPD) 是模拟预失真技术的延伸, 它通过将功放前端的预失真器配置在数字域, 更灵活地实现功放失真补偿^[15]. 与模拟预失真技术相比, 数字预失真补偿精度高、补偿带宽大、能够更灵活地与各种功放适配, 其概念一经提出就被视为十分有潜力的功放线性化技术. 然而, 早期由于数字信号处理能力不足, 复杂的预失真器建模和片上预失真信号处理难以得到工程实现. 随着数字信号处理技术的发展成熟, 加之业界亟需突破功放线性化技术的应用瓶颈, 数字预失真技术相关研究和应用在 3G, 4G 时代迎来了爆炸式增长, 逐渐成为了通信系统中最常用的功放线性化技术.

数字预失真作为一种重要的射频算法, 它的发展伴随着无线通信系统架构的演进, 在无线通信发展的各个阶段其研究的侧重点不同. 总体而言, 数字预失真技术的发展趋势可以概括为以下 3 方面.

(1) 从窄带到宽带. 早期通信系统传输信号多为窄带信号 (10 MHz 以下), 相对带宽较小, 功放记忆效应不明显, 失真以静态非线性为主. 在这一阶段, 基于查找表 (look-up-table, LUT) 结构的数字预失真是研究的主流方向, 查找表结构简单, 配置成本低, 在无/弱记忆效应失真功放的建模和补偿中具有天然的优势. 随着信号带宽增加, 功放架构趋于复杂, 功放表现出明显的动态非线性失真特点 (包括静态非线性及记忆效应). 由于较难表征记忆效应, 学术界对查找表结构的研究日渐式微, 数字预失真研究的重点转变为记忆非线性系统的建模与校正, 提出了以简化 Volterra 级数为代表的一系列高精度预失真器模型和低复杂度数字预失真算法.

(2) 从单维到多维. 为了进一步提供高速、可靠、高效的通信体验, 4G 通信系统中应用了一系列关键技术, 包络多天线发射/接收技术 (multiple input multiple output, MIMO)、载波聚合技术、包络跟踪等. 面对这些功放架构甚至发射机架构的改变, 数字预失真技术也迈出了重要的一步. 在这些发射机架构下, 功放的输入-输出映射不再用传统的单输入单输出结构表征, 而近似于多输入多输出结构, 在经过功放这类非线性器件后, 每个输入信号之间产生线性和非线性交互作用, 从而造成复杂的多流信号非线性失真. 在这一背景下, 数字预失真从传统的单维结构演变为多维结构, 并衍生出一系列与之相关的模型和算法.

(3) 从器件校正到系统校正. 随着 5G 通信的到来, 大规模 MIMO 技术在发射机中得到了大规模应用. 大规模 MIMO 系统采用大规模天线阵列提供高增益以抵消路径损耗, 在 5G 两个频段 (FR1: 410~7125 MHz; FR2: 24.25~52.60 GHz) 发射机分别采用全数字和混合波束成形架构. 新兴发射机架构为数字预失真技术提供了新的需求和发展方向: 一方面, 由于通道规模急剧增加, 针对功放校正的传统“器件级”数字预失真技术面临复杂度的瓶颈; 另一方面, 混合波束成形系统中数字通道数远远小于功放的数量, 无法实现传统的功放“一对一”校正. 因此, 针对发射机波束信号校正的“系统级”建模和线性化方法成为 5G 时代数字预失真技术的重点研究方向, 并吸引了一大批学者投入到新兴发射机架构行为建模与校正的研究中.

本文将从数字预失真技术的基本原理和系统结构出发, 介绍数字预失真技术发展的几个重要阶段及相关研究内容, 并对数字预失真技术未来发展趋势进行展望, 希望为相关从业者提供参考。

2 数字预失真基本原理和关键技术

2.1 数字预失真基本原理

数字预失真技术是目前基站发射机中最常用的功放线性化技术, 其核心思想是在功放前端数字域配置一个与功放非线性特性相逆的数字预失真器, 从而使得预失真器与功放的级联模块呈现线性响应^[13]。数字预失真原理图和图 1(c) 相似, 区别在于预失真器配置在数字域。假设预失真器的输入信号(等效基带复包络)为 $x(n)$, 预失真器的系统响应函数为 $f_{\text{DPD}}(\cdot)$, 功放的系统响应函数为 $f_{\text{PA}}(\cdot)$, 则预失真器的输出信号 $z(n)$ 和功放的输出信号 $y(n)$ 可以表示为

$$z(n) = f_{\text{DPD}}(x(n)), \quad (1)$$

$$y(n) = f_{\text{PA}}(z(n)). \quad (2)$$

将式 (1) 代入式 (2), 得到

$$y(n) = f_{\text{PA}}(f_{\text{DPD}}(x(n))). \quad (3)$$

考虑在信号增益归一化的情况下, 预失真器和功放的系统响应函数互为反函数, 即

$$f_{\text{DPD}}(\cdot) = f_{\text{PA}}^{-1}(\cdot). \quad (4)$$

将式 (4) 代入式 (3), 可得 $y(n) = x(n)$, 即功放的输出信号与原始输入信号之间呈线性关系, 数字预失真器能够完成功放的线性化。

2.2 数字预失真系统结构与关键技术

数字预失真系统的框图如图 2 所示。典型的数字预失真系统包括发射通道、反馈通道和数字信号处理模块。发射通道包括数/模转换器 (digital-to-analog convertor, DAC)、上变频器和功率放大器; 反馈通道包括耦合器、下变频器、滤波器和模/数转换器 (analog-to-digital convertor, ADC); 数字信号处理模块包括数字预失真器 (predistorter, PD) 和模型参数提取模块。具体工作流程为: 预失真器包含功放的行为逆模型, 根据功放的输入信号计算 DPD 信号, 经过数/模转换、混频后变成射频信号, 依次经过功放、天线后发射出去。在预失真器需要更新的时段, 耦合器采集功放的输出信号, 经过混频、滤波、模/数转换后生成基带信号, 送入模型参数提取模块, 该模块将功放输出信号(基带)与原始输入信号进行时延、相位和增益对齐后, 提取当前时刻预失真器模型的系数, 并传递给预失真器进行系数更新。因此, 根据数字预失真系统各部分的功能和作用, 数字预失真的关键技术可以归纳为以下 3 方面。

(1) 模型建立。数字预失真的核心是构造与功放非线性特性相逆的模型, 本质也是一种行为建模过程, 因此, 行为模型的适配与否直接关系着数字预失真的校正效果。功放和预失真器的行为模型种类繁多, 但可以概括为 4 大类: 查找表模型、基于 Volterra 级数及其简化形式的模型、分段及插值模型和神经网络模型, 其中, 由 Volterra 模型衍生出的简化模型, 由于结构简单、模型精度高等优点, 被广泛应用于学术研究中。分段及插值类模型则具有稳定性高的优势, 在工业界受到更多的关注。

(2) 自适应结构和算法。为保证数字预失真系统的稳定性和精度, 预失真器模型系数要根据环境、工作状态的变化进行更新, 涉及到自适应滤波器结构和自适应算法的选取。常见的数字预失真自适应

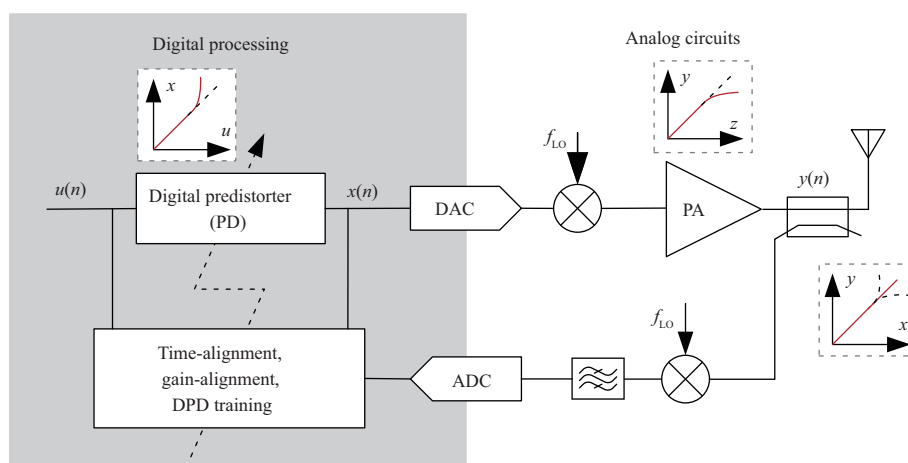


图 2 (网络版彩图) 典型数字预失真系统框图

Figure 2 (Color online) Block diagram of a typical digital predistortion system

学习结构有两种, 即直接学习 (direct learning, DL) 和间接学习 (indirect learning, IDL). 其中, DL 结构以功放前逆模型作为预失真器模型, 通过在线迭代模型系数使 PD 输入信号与 PA 输出信号的误差最小^[16]. DL 结构鲁棒性强、系数求解精度高, 但计算量较大. IDL 结构通过构造功放后逆模型近似预失真器模型, 通常不需要在线迭代, 因此, 该结构计算量较小, 但易受环境噪声影响, 稳定性稍差^[16,17]. 常见的自适应滤波算法都可以作为预失真器的参数提取算法, 包括最小二乘算法 (least square, LS)、递归最小二乘算法 (recursive least square, RLS)、最小均方算法 (least mean square, LMS) 等^[16]. 其中, 最小二乘算法结构简单、求解精度高, 在数字预失真领域得到广泛应用.

(3) 架构优化. 在传统的数字预失真系统中, 人们对数字预失真架构的研究主要集中在解决反馈通道的不理想性和成本问题. 反馈通道承担采集功放非线性信息的任务, 其特性直接影响了预失真器模型提取的精度, 因此, 许多研究尝试从算法或硬件等方面解决反馈通道不理想性带来的问题. 功放非线性失真造成频谱扩展, 反馈通道 ADC 采样率通常需要达到 3~5 倍信号带宽才能采集到足够的非线性信息. 随着信号带宽增加, 高速、高精度 ADC 带来的成本问题逐渐显现, 因此, 基于低精度或低速率 ADC 的数字预失真技术一度成为研究热点. 进入 5G 时代, 大规模 MIMO 发射机的应用使得数字预失真研究热点转变为架构突破, 空域数字预失真架构及算法成为最有潜力的功放线性化技术方案.

3 数字预失真技术发展历程

数字预失真技术的诞生和发展伴随着无线通信系统的演进, 与通信系统的需求紧密结合. 本节将根据通信技术发展的不同阶段, 详细介绍数字预失真研究的侧重点和关键技术突破.

3.1 数字预失真早期发展阶段

数字预失真技术起步于 20 世纪 90 年代初. 在数字预失真研究的早期阶段, 通常根据功放的 AM/AM 和 AM/PM 非线性行为特征提取预失真器模型, 即功放的复增益. 构造预失真器模型的一种简单直观的方法是使用查找表 (look-up table, LUT)^[18], 如图 3 所示. 在查找表中, 功放的幅度和相位响应被记录为输入功率的函数, 将这些响应求逆以保证预失真器的线性化功能^[19]. 预失真工作时, 输入信号功率作为地址索引, 查表得到唯一的幅度相位信息.

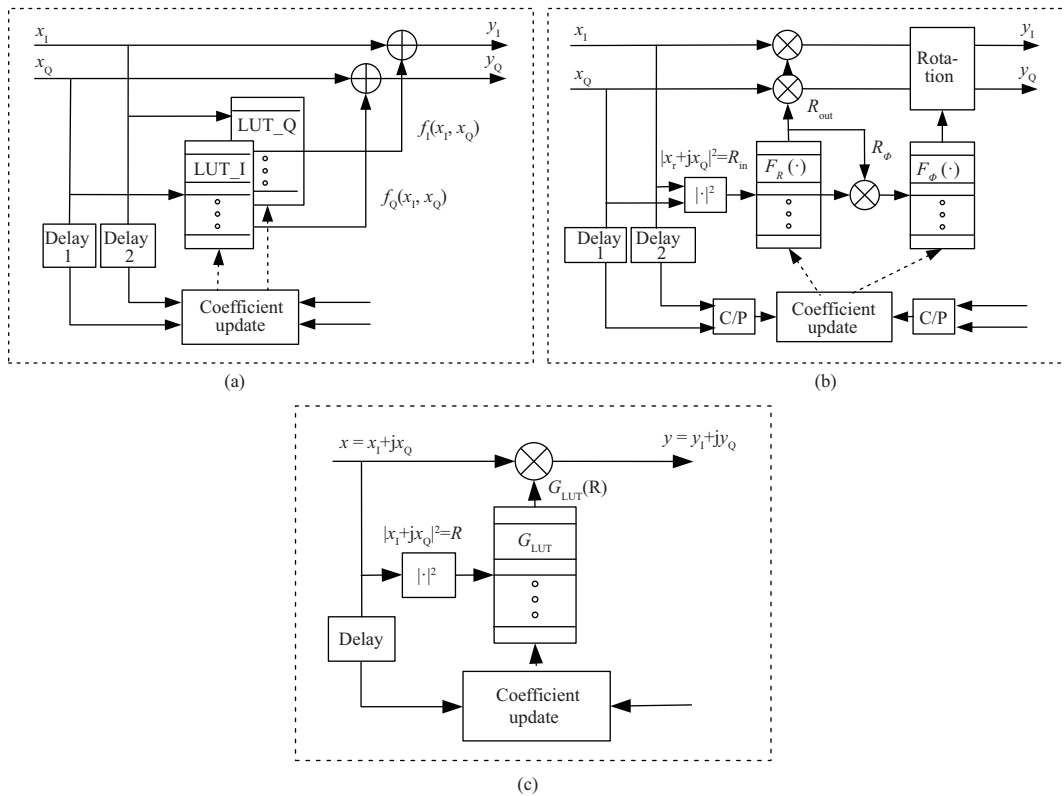


图 3 查找表模型结构示意图. (a) 映射结构; (b) 极坐标结构; (c) 复增益结构

Figure 3 Structure diagram of lookup table model. (a) Mapping structure; (b) polar coordinate structure; (c) complex gain structure

通过查找表实现功放数字预失真线性化的研究可以追溯到 1983 年, 美国贝尔实验室的 Saleh 等^[19]提出数字无线电系统的迭代线性化技术. 根据不同的查找表构造方式, 基于查找表的预失真器结构分为 3 种: 映射 (mapping) 结构、复增益 (complex gain) 结构和极坐标 (polar) 结构. 基于映射结构的预失真器需要两张二维查找表, 查找表的输入分别为正交的两路 I, Q 输入信号, 而两张查找表的输出分别对应所需的 I 路或 Q 路预失真信号^[20~22]. 1990 年, Faulkner 等^[23]提出了基于两张一维查找表的极坐标预失真结构, 两张查找表分别用于幅度失真和相位失真的校正. 幅度查找表根据信号的幅度进行搜索, 输出预失真信号的幅度信息, 而相位查找表则以预失真信号的幅度作为输入, 查找预失真信号的相位信息. 同年, Cavers^[24, 25]提出了基于一张一维查找表的复增益预失真结构, 与极坐标结构不同, 复增益结构根据输入信号的功率值进行搜索, 输出预失真信号所需的复增益, 与输入信号相乘后得到预失真信号. 复增益查找表结构占用的存储资源少、索引时间短、更新复杂度低, 成为了较常用的查找表结构^[26].

此外, 还可以通过模型拟合的方法获得功放 AM/AM 和 AM/PM 失真特征, 即非线性行为建模. 由于预失真器和功放的响应函数互逆, 绝大部分功放行为模型也可以作为预失真器模型. 早期对功放行为建模的研究大多面向行波管放大器 (travelling-wave tube amplifiers, TWTAs), 提出了一些经典的无记忆模型, 包括复多项式模型、Saleh 模型、改进 Saleh 模型、Bessel-Fourier 模型、Hetrakul & Taylor 模型、Berman & Mahle 模型等^[27~31]. 这类模型对固态功率放大器 (solid-state power amplifiers, SSPAs) 在窄带激励下的静态 AM/AM 和 AM/PM 特性曲线也有良好的拟合效果, 文献 [27] 给出了基

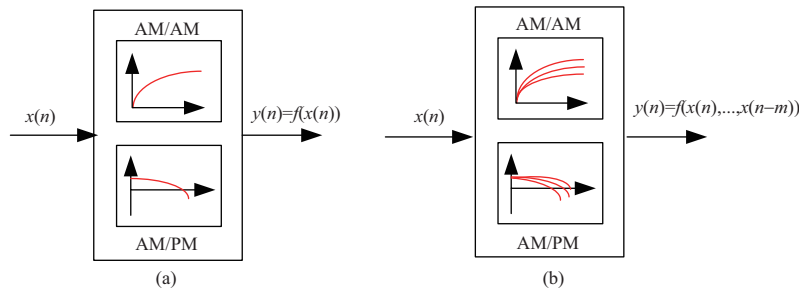


图 4 (网络版彩图) 功放 AM/AM 和 AM/PM 特征曲线示意图. (a) 无记忆效应; (b) 存在记忆效应

Figure 4 (Color online) Schematic diagram of the AM/AM and AM/PM characteristic curve of the power amplifier. (a) No memory effect; (b) memory effect

于 1.93~1.96 GHz LDMOS 功放的建模精度比较, 在 3.84 MHz 带宽的 WCDMA 信号激励下, 上述模型均能达到 $-27\sim-33$ dB 的建模精度 (以归一化均方误差表示).

3.2 21 世纪初

进入 21 世纪后, 人们对通信的需求不仅局限于语音通话, 而更多地向数据业务转移. 为了提高数据传输速率, 通信信号带宽从 KHz 量级提高至 10~100 MHz, 射频功放的非线性特征也发生改变. 功放的非线性可以分为静态非线性和记忆效应两类^[16]. 记忆效应是功放在宽带信号激励下表现出的失真, 它在时域被描述为时间相关性, 即功放在某一时刻的输出 $y(n)$ 不仅由当前时刻的输入 $x(n)$ 决定, 还受过去一段时间的输入 $x(n-1), x(n-2), \dots, x(n-k)$ 影响. 因此, 当功放存在记忆效应时, 其 AM/AM 和 AM/PM 特征曲线不再是单一的曲线, 而呈现明显的发散特征, 如图 4 所示.

记忆效应在频域上表现为电路响应具有频率依赖性. 因此, 在严格的定义下, 一个无记忆的电路中不应该存在电容、电感等储能器件, 而功放电路明显不满足这一条件. 在典型的功放拓扑电路中, 电容、电感器件不仅参与到无源网络 (匹配网络和偏置网络等) 的设计中, 在晶体管的等效结构中也普遍存在电容、电感的寄生效应. 然而, 在 20 世纪末的功放行为建模和预失真器研究中, 仍然广泛采用功放的无记忆效应假设, 这是由于输入信号的相对带宽较窄, 电容、电感器件的频率相关性可以被忽略. 随着信号带宽的增加, 记忆效应的影响越来越明显, 21 世纪初的数字预失真研究也围绕着存在记忆效应时的功放建模和校正而逐渐展开.

进行记忆效应失真的建模之前, 首先需要明确记忆效应的成因和分类. 记忆效应按照物理成因可被分电记忆效应和热记忆效应^[32], 按相对载波的变化快慢可分为短时记忆效应和长时记忆效应^[33], 按行为特征可分为线性记忆效应和非线性记忆效应^[34]. 行为建模领域更关注行为表现特征: 线性记忆效应主要对应于功放输入输出匹配电路的时延和相移, 归因于电路阻抗在载波频率内的变化, 仅考虑线性记忆效应时, 可以用通过级联的“线性滤波器-静态非线性传输函数-线性滤波器”模块对功放进行建模. 非线性记忆效应成因更为复杂, 包括电流崩塌效应 (trapping effect)^[35]、热效应导致的静态偏置点漂移^[36]、晶体管各级之间存在“反馈”机制^[37,38]等. 在这些因素的影响下, 功放电路在信号包络频率 (低频) 和谐波频率处阻抗不平坦, 信号的偶次交调分量落在这些频段内产生时延、相移等失真, 其奇次交调分量则被调制回载波频率附近, 从而使功放的非线性和记忆效应“耦合”在一起, 建模难度更大. 下面将分别介绍两类非线性建模方法.

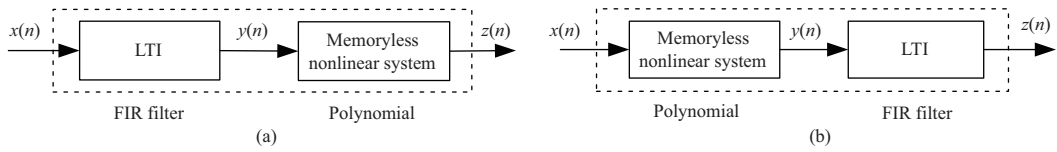


图 5 两类双盒模型结构. (a) Wiener 模型; (b) Hammerstein 模型
 Figure 5 Two kinds of two-box model structures. (a) Wiener model; (b) Hammerstein model

3.2.1 包含线性记忆的非线性建模

线性记忆效应可通过线性滤波器描述, 按照模型结构不同, 功放或预失真器的模型分为双盒 (two-box)、三盒 (three-box), 以及并行级联 (parallel-cascade) 模型 [27]. 典型的双盒模型结构包括 Wiener 模型 [39] 和 Hammerstein 模型 [40] 两类, 如图 5 所示. 两种模型都采用相同的级联结构, 将功放拆解为线性时不变系统 (linear time invariant, LTI) 和静态非线性系统的级联, 而级联顺序不同. Wiener 结构采用“线性系统 – 非线性系统”的连接顺序, Hammerstein 结构与其相反, 采用“线性系统 – 非线性系统”的连接顺序. 通常情况下, LTI 系统可以用 FIR 或 IIR 滤波器表示, 而静态非线性系统则可用多项式、Bessel 函数等非线性函数建模.

三盒模型是双盒模型的延伸, 它通过增加一个滤波器提供了描述功放非线性行为的额外维度. 典型的三盒模型是 Wiener-Hammerstein 结构 [41], 如图 6 所示. 三盒级联结构与仅考虑线性记忆效应的功放模型较为对应: 两个线性滤波器模型用于描述功放输入和输出匹配网络的相移和时延情况, 无记忆非线性模块则代表功放的静态非线性失真. 值得注意的是, 即使增加了额外的模型自由度, 三盒模型仍然无法描述非线性记忆效应.

3.2.2 包含非线性记忆的非线性建模

在 Wiener, Hammerstein 等双盒和三盒模型中, 对记忆效应和静态非线性的描述是分离的, 这使得这类模型结构简单, 复杂度较低. 然而, 存在非线性记忆效应才是宽带激励下功放行为失真的常态, 此时, 功放的静态非线性和记忆特征是通过交调失真耦合在一起的, 需要更强大的建模手段. 目前能够描述非线性记忆效应失真的常用行为模型分为三大类: Volterra 级数及其简化模型 [42~55]、基于样条函数的分段模型 [56~65] 和神经网络模型 [66~71], 其中, 基于 Volterra 基函数的模型是功放行为和预失真建模研究中应用最广泛的模型.

Volterra 级数是描述非线性系统的常用工具 [42]. 1988 年, Biglieri 等 [43] 证明了 Volterra 模型的 p 阶可逆性, 并首次使用 Volterra 模型的逆模型对功放的失真进行补偿. 在功放和预失真建模时, 由于射频链路在功放输出端的滤波作用, 我们通常仅关注信号载频附近的非线性失真补偿. Volterra 级数的基带等效模型表示为

$$y_{\text{Volterra}}(n) = \sum_{\substack{p=1 \\ p \text{ odd}}}^P \sum_{m_1=0}^M \sum_{m_2=m_1}^M \cdots \sum_{m_{(p+1)/2}=m_{(p-1)/2}}^M \cdots \sum_{m_{(p+3)/2}=0}^M \cdots \sum_{m_p=m_{p-1}}^M h_{p,m_1,\dots,m_p} \prod_{i=1}^{(p+1)/2} x(n-m_i) \prod_{k=(p+3)/2}^p x^*(n-m_k), \quad (5)$$

其中, M 为模型的记忆深度, P 为模型非线性阶数, h_{p,m_1,\dots,m_p} 表示第 p 阶 Volterra 核, 即模型系数. Volterra 模型中不同时延项信号的交调组合十分丰富, 它能够很好地描述存在非线性记忆效应时功放

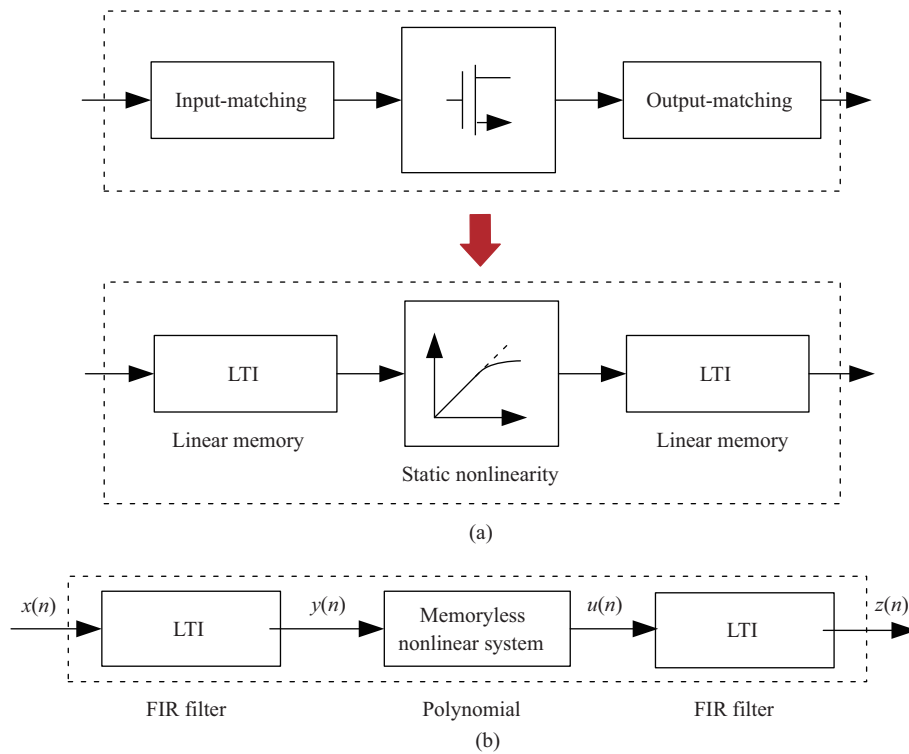


图 6 (网络版彩图) 典型的三盒模型. (a) 三级级联和功放行为原理拆解图对比; (b) Wiener-Hammerstein 模型结构框图

Figure 6 (Color online) Typical three-box model. (a) Comparison of the three-level cascade and power amplifier behavior principle disassembly diagram; (b) block diagram of the Wiener-Hammerstein model structure

的非线性行为. 然而, 随着记忆深度和模型非线性阶数的增加, Volterra 模型的复杂度呈爆炸式增长, 在数字预失真这种讲求实时性和高效性的在线算法中不具备实用价值. 实际上, Volterra 模型中很多非线性基函数存在相似性, 模型的冗余度很高, 需要对其进行截断或剪枝. 2004 年前后, 出现了一大批具有应用价值的简化 Volterra 模型^[44~55], 如记忆多项式 (memory polynomial, MP)^[44]、包络记忆多项式 (envelope memory polynomial, EMP) 模型^[48]、广义记忆多项式 (generalized memory polynomial, GMP)^[45]、DDR-Volterra 级数模型^[46,47] 等. 2004 年, Ding 等^[44,49,50] 基于间接学习结构提出了一种强鲁棒性 MP 模型预失真器, 并讨论了模型偶次项对功放建模和预失真线性化性能的影响. MP 模型的表达式如式 (6), 与完备的 Volterra 模型相比, 它仅保留了“对齐的 (aligned)”时延项, 在大幅降低基函数数量的同时保证了建模精度.

$$y_{MP}(n) = \sum_{p=1}^P \sum_{m=0}^M x(n-m)|x(n-m)|^{p-1}, \quad (6)$$

MP 模型结构紧凑, 复杂度低, 已经成为数字预失真领域最常见的行为模型. 2006 年, Morgan 等^[45] 提出了 GMP 模型, 在对 Volterra 模型进行简化时保留了部分交叉记忆项, 如下所示:

$$y_{GMP}(n) = \sum_{p=1}^{P_1} \sum_{m=0}^{M_1} x(n-m)|x(n-m)|^{p-1}$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{p=2}^{P_2} \sum_{m=0}^{M_2} \sum_{l=1}^{L_1} x(n-m)|x(n-m-l)|^{p-1} \\
& + \sum_{p=2}^{P_3} \sum_{m=0}^{M_3} \sum_{l=1}^{L_2} x(n-m)|x(n-m+l)|^{p-1}, \tag{7}
\end{aligned}$$

与 MP 模型相比, GMP 模型在宽带场景下的建模精度更高, 该模型也广泛用于宽带数字预失真的相关研究中.

可以认为, 基于 Volterra 模型的数字预失真研究是一段在模型复杂度和性能之间寻求平衡的过程, 而多盒模型的提出为功放行为建模提供了另一种简化思路. 多盒模型通过级联或并联的方式连接多个非线性模型, 使得每个子模型的复杂度降低. 2009 年, Hammi 等^[51] 提出并联的双非线性双盒 (parallel twin nonlinear two-box model, PTNTB) 模型, 通过将一个高阶无记忆非线性模型和一个低阶 MP 模型并联, 在降低模型总体复杂度的同时实现与传统 MP 模型相当的精度. 在此基础上, Younes 等^[52] 提出了三级并联的 PLUME 模型, 通过增加一个并联的 EMP 模型分支提供对交叉记忆项的表征, 从而实现与 GMP 模型相似的精度. 考虑到稳定性因素, 级联多盒结构以两级级联为主, 多为增强型的 Wiener/Hammerstein 模型^[53,55]. Liu 等^[54] 对 Hammerstein 模型进行了改进, 在传统 Hammerstein 模型的 FIR 模块中增加一个偶次记忆非线性滤波器分支, 实现了对非线性记忆效应的建模. Moon 等^[55] 则提出将 Hammerstein 模型中的 FIR 模块替换成低阶 Volterra 级数模型, 引入了交叉记忆效应项, 从而实现更优的性能.

从信号处理角度来看, 功放行为建模是一个“黑盒”建模过程, 即该过程可以简单地被视为一般的非线性系统识别问题. 因此, 除了 Volterra 类模型外, 仍然应该有许多模型和方法值得被挖掘, 基于正则分段线性函数 (canonical piecewise-linear function, CPWL) 的模型则是其中代表. 20 世纪 70 年代 Chua 等^[56] 提出 CPWL 模型, 它具有简单的模型结构和较高的建模精度. 然而, 原始的 CPWL 模型系数和基函数之间是非线性 (nonlinear-in-parameter) 的关系, 模型系数求解算法较为复杂, 很难在数字预失真领域得到应用. 经过深入的研究, Zhu^[57,58] 提出了分解矢量旋转 (decomposed vector rotation, DVR) 模型, 该模型基函数是基于 CPWL 函数推导的, 却具有 linear-in-parameters 特性. 此后, 基于 CPWL 模型或 DVR 模型的分段函数类模型在数字预失真领域得到了应用和学者的深入研究^[59~65].

3.3 约 2008 年 ~ 2016 年

4G 通信技术标准在 2008 年左右得到完善, 一些关键的无线通信核心技术也逐渐从学术界流向产业界, 帮助用户得到更加迅捷可靠的通信体验. 4G 通信的关键技术包括 OFDM 技术、多天线发射/接收技术 (MIMO)、智能天线技术、载波聚合等. 新技术的应用推动着发射机架构的演进, 相应地, 发射机的数字预失真线性化技术也面临新的挑战.

- 由于频率资源稀缺, 无线通信频谱的碎片化已成为常态. 载波聚合技术的应用使得同时利用这些频谱碎片传输成为了可能, 这要求无线通信系统能够兼容多频段/多体制的信号. 在双频/多频并发信号 (concurrent dual/multi-band signal) 的激励下, 功放产生的非线性失真特性与单频信号激励情况下的失真特性截然不同, 传统功放行为建模和数字预失真方法不再适用, 需要提出合适的双频/多频数字预失真技术.

- MIMO 技术是 4G 系统中重要的特征技术. MIMO 发射机包含多条发射通道, 当通道间隔离不理想时, 存在明显的串扰问题 (通道间信号互耦效应). 串扰信号与发射信号混合, 经过功放的非线性作用后产生复杂的混合非线性失真, 影响着传输信号的质量. 因此, 数字预失真需要针对多通道发射

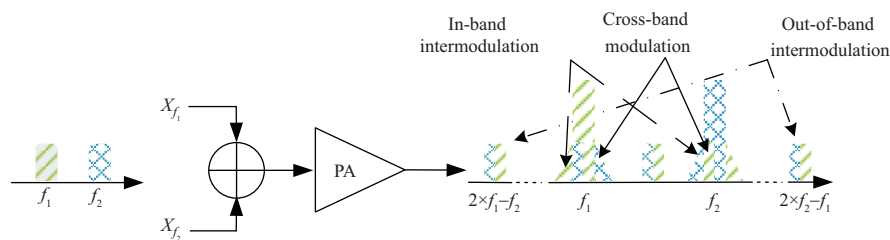


图 7 (网络版彩图) 双频并发场景下功放输入和输出端信号频谱示意图

Figure 7 (Color online) Schematic diagram of input and output signal spectrum of power amplifier in concurrent dual-band scenario

机的失真特点研究高性能的补偿方案.

• 随着高阶调制、宽带传输、高效功放架构等技术的应用, 数字预失真技术发展面临复杂度瓶颈. 一方面, 采集和处理宽带信号失真增加了数字预失真技术的计算开销和硬件成本; 另一方面, 包络跟踪 (envelope tracking, ET)、异相型 (outphasing) 功放等新型高效功放架构失真特性更加复杂, 预失真算法和模型性能受到了挑战.

3.3.1 数字预失真技术的多维化发展

进入 4G 时代后, 数字预失真的一个重要技术特点是“多维化”发展, 具体体现为在双频并发、多通道发射机、包络跟踪等场景中, 功放的行为特征不再是传统的单输入 – 单输出模式, 而是多输入 – 单输出或多输入 – 多输出的. 下面将根据不同的应用场景具体介绍多维数字预失真技术.

(1) 双频/多频并发场景的数字预失真技术. 频谱资源具有不可再生性, 是无线通信系统中最稀缺的资源之一. 为了高效利用碎片化的频谱资源, 无线通信网络建设需进行多频覆盖以提高系统容量和用户体验, 对系统的挑战进一步加剧. 射频前端需要支持多频段信号的传输和处理, 而射频功放作为前端模块的核心器件, 对其双频/多频并行化、线性化的研究成为了热点问题 [72, 73].

考虑到器件性能、系统复杂度、应用成本等因素, 能够支持双频信号并发的发射机系统较为常见. 双频并发场景下, 功放的非线性失真特性与单频激励下的情况存在显著差异, 传统数字预失真技术不再适用. 图 7 为双频并发信号激励下功放输入和输出端的信号频谱示意图, 功放的输出信号包括 3 种失真成分:

- 带内交调失真 (in-band intermodulation). 在功放非线性作用下, 两个频段信号在各自频段内的交调失真, 其本质和单频信号激励下功放产生的非线性失真相似;
- 带间交调失真 (cross-band modulation). 一个频段的信号受另一频段信号调制产生的失真, 该失真成分位于两个频段载波频率附近;
- 带外交调失真 (out-of-band intermodulation). 两个频段信号相互调制产生的失真, 该失真频率离两个输入信号的载波频率较远.

在上述 3 种失真中, 带间交调和带外交调是双频信号并发场景特有的. 由于双频信号的频率间隔较大, 带外交调失真频率离载波频率较远, 可通过滤波器滤除. 带间交调失真较难处理, 一方面, 它位于载波频率周围而无法通过模拟的手段消除, 另一方面, 传统的数字预失真模型无法表征该类失真. 因此, 双频数字预失真技术主要围绕着双频并发功放的失真建模和补偿而展开.

2008 年左右, 陆续有学者开始研究功放在非连续载波激励下的失真特性, 提出了一些具有频率选择性的数字预失真技术 (frequency-selective DPD) [74, 75]. 2011 年, 加拿大 University of Calgary 的

Bassam 等^[76,77]首次提出了用于双频并发功放的数字预失真技术——2D-DPD 技术, 通过将带间交调失真的表征纳入建模过程, 实现了对双频功放的有效线性化。同年, Chen 等^[78]在双频功放电路设计的文章中利用 2D-DPD 模型实现了 Doherty 功放的建模和线性化。在此之后, 双频数字预失真技术成为了 2011~2016 年间功放线性化技术的热点研究问题, 学者们从模型、算法、架构等各个方面完善着 2D-DPD 技术, 并成功推动了该技术在双频发射机产品中的应用。

最早的 2D-DPD 模型是多项式模型的二维扩展, 它能达到较高的建模精度, 也具有系数较多、复杂度高的缺陷, 因此, 学者们在降低 2D-DPD 技术复杂度方面做出了很多努力。Liu 等^[79,80]提出了二维增强型 Hammerstein 模型 (2D-AH) 和二维修正 MP 模型 (2D-MMP), 而 Zhang 等^[81]提出了针对 2D-DPD 模型的剪枝算法。这些方法能够在不损失精度的前提下, 将 2D-DPD 技术的复杂度降低至与传统数字预失真技术相当。此外, 随着模型系数规模增大, 多项式基的模型面临数值稳定性问题。学者们提出了基于三次样条 (cubic functions) 函数^[82]、基于正交多项式^[83]、基于 CPWL 函数等模型的 2D-DPD 技术^[84], 增强了双频预失真模型的稳定性和性能。在文献 [85~87] 中, 作者分别基于简化的双输入 Volterra 模型和神经网络模型扩展了 2D-DPD 模型, 以补偿载波泄露和调制器不平衡问题。2013 年, Younes 等^[88]遵循与 2D-DPD 相似的规律推导了三频并发场景下的功放和数字预失真行为模型, 并在实验中成功补偿了三频并发功放的非线性失真。

在 2D-DPD 技术的应用层面, Kwan 等^[89]提出了 2D-DPD 技术的查找表实现方案, Ding 等^[90]则进一步对 2D-LUT-DPD 实现方案进行改进, 并在 FPGA 平台进行了实物测试。在文献 [91,92] 中介绍了一个基于商用 FPGA 和两路混合信号的 DPD (mixed signal DPD, MSDPD) 评估板, 专门用于设计和实现并发双频数字预失真。以该平台为基础, Narahariseti 等^[91]提出了基于样条函数的双频并发 DPD 技术, 以简化强非线性情况下 2D-DPD 技术的硬件实现复杂度。同年, Quindroit 等^[92,93]提出了一种在 FPGA 内部实现正交多项式并发双频 DPD 的高效硬件实现方案, 并评估了不同场景下的补偿性能。

(2) 多通道 MIMO 发射机. 数字预失真“多维化”扩展的另一个契机是多通道 MIMO 发射机的应用和普及。在 MIMO 发射机中, 由于不同通道间的信号使用相同的工作频率并具有相似的传输功率, 因此通道间有可能发生串扰 (crosstalk), 这种串扰在集成电路 (integrated circuit, IC) 设计中更为重要。根据串扰的性质不同, 可分为线性串扰和非线性串扰两类。当发射机输出端 (天线端) 的串扰效应可以建模为干扰和所需信号的线性函数时, 串扰被认为是线性的。换言之, 受线性串扰影响的信号不会产生额外的非线性分量。相反, 非线性串扰在信号产生非线性失真之前就会影响信号^[17]。由于功放是发射机非线性的主要来源, 因此在功放之前的电路中存在的串扰是非线性串扰的主要来源, 而发生在功放之后的串扰, 以天线串扰为代表, 则被认为是线性串扰^[94]。图 8 为通道间串扰的起源和特征示意图。

由于通道间串扰的存在, 功放的输出信号通常包含其他通道传输信号的信息。因此, 预失真器建模时, 除了需要校正来自本通道信号的非线性失真外, 还需要消除串扰造成的失真和干扰。在这种情况下, 来自各个通道的信号都成为预失真器模型的输入, 预失真器从传统的单输入结构转变为多输入结构, 出现了一些补偿 MIMO 发射机中串扰和功放非线性的模型^[94~103]。2009 年, Bassam 等^[94]讨论了线性和非线性串扰对功放的影响机理, 提出了 CO-DPD 技术以线性化 MIMO 发射机中的功放。在 -20 dB 串扰干扰情况下, 应用 CO-DPD 技术后功放输出信号的邻道泄露功率比 (adjacent channel power ratio, ACPR) 指标优于传统 DPD 技术 13 dB。同课题组的 Saffar 等^[95]和 Abdelhafiz 等^[96]进一步研究了强非线性串扰环境下的功放失真特性, 提出了 multivariable polynomials (MVPs) 模型、2×2 parallel-Hammerstein (PH) 模型、A-COMPM 模型, 将预失真器的线性化性能在 CO-DPD 技术的基础

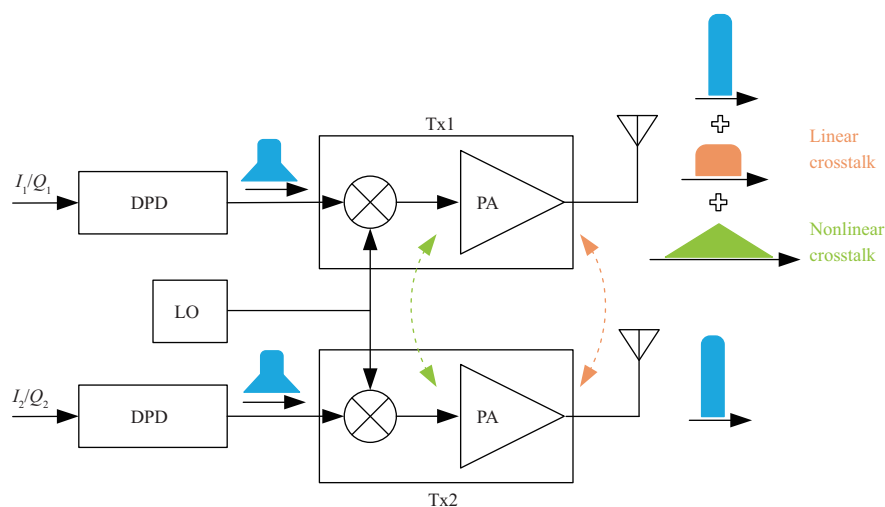


图 8 (网络版彩图) 双通道 MIMO 发射机中的线性串扰和非线性串扰

Figure 8 (Color online) Linear crosstalk and nonlinear crosstalk in a dual-channel MIMO transmitter

上再次提高 6 dB 以上. 在早期的研究中, 天线网络造成的串扰通常被定义为线性串扰. 然而, 在一些集成多通道系统中, 由于功放和天线间缺少隔离器, 天线串扰形成的后向回波会改变功放的非线性行为. Vaezi 等^[97] 讨论了这种后向回波对功放非线性的影响, 提出了 2DXY-GMP 模型, 并在强串扰等级下 (-15 dB 及 -10 dB) 进行了验证. 此外, 除通道间串扰外, MIMO 发射机也存在 I/Q 不平衡、载波泄露、功放非线性失真等不理想因素的干扰, Khan 等^[98] 分析了上述不理想因素联合作用下的功放失真特性, 提出了一种增强的线性复共轭 (augmented linear complex conjugate, ALCC) 模型, 而 Jaraut 等^[99] 则采用复合神经网络对发射机不理想失真进行联合校正.

(3) 双输入型高效功放的线性化. 2010 年前后, 人们尝试应用一些新型的功放架构以获得更高的效率, 如包络跟踪 (ET) 功放、动态负载调制 (dynamic load modulation, DLM) 发射机、异相型 (outphasing) 功放等, 这类功放的共同特点是存在两个输入信号通道, 并且两个输入信号都以某种方式影响功放的输出信号. 因此, 从行为建模的角度看, 这类功放架构可以被视为双输入的非线性系统. 由于其输出信号不仅依赖于单一输入信号, 传统的单输入 - 单输出数字预失真方案性能受损严重, 需要应用二维甚至多维数字预失真技术进行校正.

2010 年, Cao 等^[104] 研究了 DLM 发射机的非线性失真特性. DLM 发射机包含一条射频输入信号和一条基带控制信号通道, 该 DPD 技术将常规单输入 - 单输出记忆 DPD 模型与效率优化的静态逆模型相结合, 静态逆模型可确保发射机以高效率工作, 而记忆 DPD 模型则消除了残余的非线性记忆效应. 2012 年, 该课题组成员进一步提出了一种用于 DLM 发射机的双输入预失真方案, 该方法首先通过连续波测量来拟合得到最优效率下的基带控制信号函数, 再利用二维广义记忆多项式 (2D-GMP) 模型构造预失真器^[105].

ET 技术通过将包络信号叠加在漏极电压上, 使功放很宽的功率水平范围内以很高的效率连续工作. 因此, ET 功放的行为模型和预失真器模型中, 通常以射频调制信号和其包络作为模型的两个输入^[106~111]. 值得注意的是, 在本节中介绍的 2D-DPD 类技术在经过适配后都可用于 ET 功放的线性化. 此外, 由于 ET 架构的两个输入是“相关的”, 单输入 - 单输出的预失真结构可以直接应用, 但需要付出一定的复杂度代价. 考虑得到 ET 功放“非常规”的非线性失真特性, Zhu 等^[112] 在 2008 年提

出了基于矢量门限分解的分段 Volterra 级数模型, 校正性能比传统预失真方案提高 6 dB 以上。

3.3.2 低复杂度数字预失真

降低复杂度的研究贯穿数字预失真技术研究的始终, 在技术发展的各个阶段呈现不同的侧重点, 而在这一阶段, 低复杂度数字预失真研究的热点问题是降低硬件成本。2010 年前后, 载波聚合技术的应用使得信号带宽成倍增长, 在宽带 LTE-A 系统中, 信号调制带宽达到 100 MHz。传统数字预失真技术需求 3~5 倍信号带宽的线性化带宽以观测和补偿功放的非线性失真, 在这种情况下, 传统数字预失真的带宽需求将达到 500 MHz。如此宽的带宽要求将显著增加系统设计的难度, 它不仅需要非常高速的数据转换器, 还需要超宽带的发射和接收链路, 数字预失真技术的软硬件成本将是通信系统无法接受的。

2012 年, Yu 等^[113,114] 提出了带限数字预失真算法 (band-limited digital predistortion, BL-DPD), 率先将带限、滤波、欠采样等操作引入数字预失真算法, 将采样率需求降到了信号带宽的 1.4 倍。BL-DPD 技术基于间接学习结构, 它假设功放的输出与天线之间存在一个窄带滤波器, 将滤波器与功放整体当作一个非线性系统, 求解该系统的逆模型作为预失真器模型。同年, Zhang 等^[115] 在功放输出端配置真实的带通滤波器进行了实验。翌年, Ding 等^[116] 和 Liu 等^[117] 提出基于直接学习结构的带限反馈 DPD 方法, 将输出信号采样率降低到 2 倍信号带宽左右。为了避免 BL-DPD 计算过程中每个基函数与窄带滤波器的复杂卷积操作, 文献^[118~120] 提出了一些前向建模辅助的简化方案, 其基本思想是带限的方法估计出功放的前向行为模型, 然后利用该前向模型估计出功放的全带宽输出信号, 再根据间接学习算法建立预失真器的模型, 最终可以将采样率降至信号带宽的 2 倍以下, 其中, Wang 等^[118] 提出的基于欠采样信号的两步法 DPD 算法对 ADC 采样率需求仅为信号带宽的 1/10。另一类算法基于频谱扩展运算, 通过带限信号估计未采集到的信号频谱, 进而进行预失真相关运算, 该类算法可以将采样率降低至 1 倍信号带宽^[121,122]。此外, Liu 等^[123] 通过两个低速 ADC 来完成超宽带数字预失真, 也能够使采样率降低到 1 倍信号带宽。

3.4 约 2016 年至今

5G 是面向 2020 年以后通信需求而发展的新一代移动通信系统, 随着 5G 关键技术的逐渐成熟, 其发射机架构也日渐明朗。大规模 MIMO 技术是 5G 核心的无线传输技术, 它通过在发射机中配置规模巨大的天线阵列 (通常几十到几百根天线) 来提供超高的频谱效率和可靠的传输环境。相比于传统发射机, 5G 无线通信基站的天线数量将提高 1~2 个数量级以上, 发射机架构也根据应用频段和阵列规模的不同有所变化。在 5G 低频段 (FR1: 410~7125 MHz), 由于阵列规模较小 (低于 100 根天线), 发射机仍采用传统的全数字波束成形 (digital beamforming, DBF) 架构, 如图 9(a) 所示。在全数字发射机中, 射频链路 (即数字通道) 的个数与功放和天线的数量相同, 传统数字预失真架构可直接移植。然而, 在 5G 高频段 (FR2: 24.25~52.60 GHz) 发射机中, 天线阵列规模较大 (100 根天线以上), 综合考虑成本和性能后混合波束成形架构 (hybrid beamforming, HBF) 成为发射机架构的首选。根据模拟波束成形网络结构不同, 混合架构发射机又分为基于子阵连接和全连接两种架构, 如图 9(b) 和 (c) 所示。随着有源天线系统和混合架构发射机的引入, 数字预失真技术在系统中面临着新的挑战, 总结如下。

- 大规模 MIMO 系统天线数量增多, 为了实现小型化的需求, 阵列单元排布更加密集, 多通道间的相互耦合和串扰愈发明显, 传统的 SISO DPD 问题延伸为 MIMO DPD 问题。早期针对多通道发射机的数字预失真工作主要针对线性串扰的建模和消除, 提出了串扰交叉记忆多项式模型 (crossover memory polynomial model, CO-MPM)、增强的交叉记忆多项式模型 (augmented crossover memory polynomial

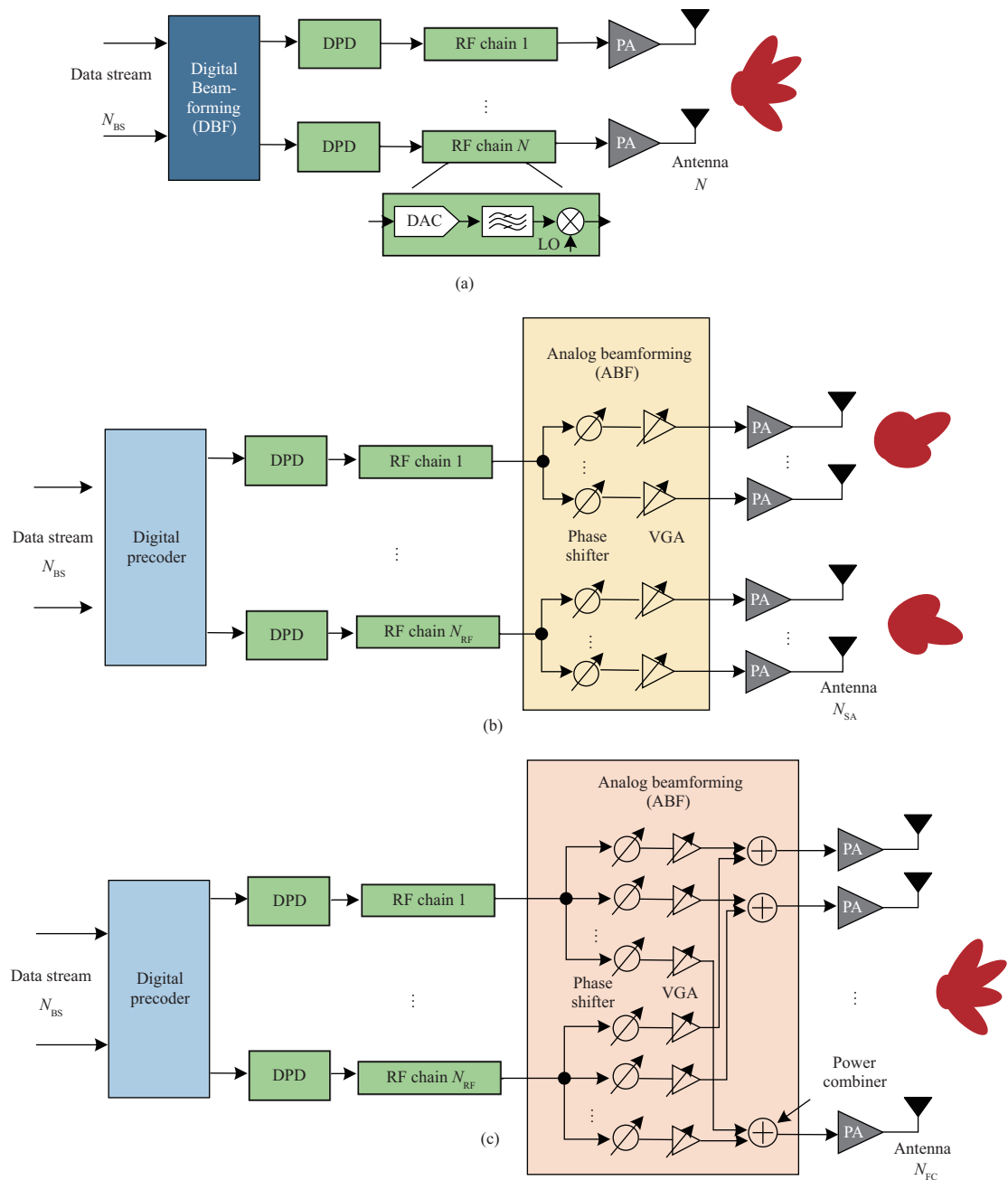


图 9 (网络版彩图) 基于不同波束成形技术的发射机架构. (a) 全数字波束成形; (b) 基于子阵连接的混合波束成形; (c) 基于模拟全连接的混合波束成形

Figure 9 (Color online) Transmitter architecture based on different beamforming technologies. (a) All digital beamforming; (b) hybrid beamforming based on subarray connection; (c) hybrid beamforming based on analog full connection

model, ACO-MPM) 等模型 [94~96]. 然而, 当涉及到大规模 MIMO 场景时, 大多数当前的 MIMO DPD 模型变得非常复杂, 无法在实际系统中使用. 因此, 为了降低功耗和硬件成本, 需要研究适合大规模 MIMO 系统的低复杂度 DPD 算法.

- 在混合架构发射机中, 射频链路数量远远小于功放和天线数量, 一路数字信号需要同时驱动多

路功放. 传统数字预失真方案需要每个功放配置一个专用的预失真器和反馈通道, 这种匹配关系在混合架构发射机中天然得不到满足, 亟待提出新颖的预失真架构和方案.

- 传统的数字预失真方案要求每个功放有一个专用的反馈通道来观察其非线性行为. 反馈通道包括耦合器、下变频器和 ADC, 需要占用一定的发射机硬件资源. 然而, 由于阵列规模的扩大以及每个射频链中天线和功放的集成, 在毫米波集成大规模 MIMO 发射机中实现传统的“一对一”反馈几乎是不可能的. 因此, 需要提出简化的数字预失真反馈架构.

上述挑战是两种大规模 MIMO 发射机中数字预失真技术面临的共同问题, 然而, 不同架构发射机的数字预失真迫切需要解决的问题有所区别. 例如, 在全数字发射机中, 随着发射机通道数增加, 虽然传统数字预失真架构的复杂度上升了, 但由于传统数字预失真架构可以直接移植, 研究的重点在于多通道发射机的低复杂度建模和线性化. 然而, 在混合架构发射机中, 由于传统数字预失真架构失效, 研究则集中于数字域失真的架构突破. 下面将分别介绍两种发射机架构下具有代表性数字预失真研究工作.

3.4.1 全数字架构发射机的数字预失真技术

大规模 MIMO 系统的集成度更高, 单元排布密集, 由于跨通道耦合或公共本振 (local oscillator, LO) 的泄漏, 每个功放的非线性行为可能会受到相邻通道行为的影响, 传统 SISO DPD 不足以线性化具有强串扰的大规模 MIMO 系统. 传统 MIMO 发射机的串扰消除及线性化研究已经开展了一段时间, CO-MPM^[94], 2×2 PH^[95], ACO-MPM^[96] 等模型能够成功应用于小规模多通道系统的线性化.

从理论上讲, 具有 M 通道的发射机可以通过 M 输入 – M 输出 (M 维) 的非线性模型进行建模和线性化, 由于需要反应所有分支的相互作用, 该类模型的复杂性通常随着 M 的增加而爆炸式增长. 降低模型中的非线性和交调阶数似乎是降低复杂度的一种合理方法, 但它损害了线性化精度, 仅适用于弱非线性串扰系统.

为了避免大规模 MIMO 系统中预失真模型复杂度的爆炸性增长, 需要研究新颖的模型架构. Hausmair 等^[124,125] 和 Barradas 等^[126] 提出了一种不同的方法来重新思考 M 通道发射机的线性化, 该方法使用一个双输入模型作为传统 M 维模型的替代方案. 在双输入模型中, 第 1 个输入分支仅包含原始输入信号, 而第 2 个输入分支则表示为其余通道信号的线性加权和, 用以模拟多通道串扰. 第 2 个分支的输入信号可以利用天线阵列的多端口 S 参数近似计算, 由于天线网络是线性和无源的, 因此用以描述串扰和负载失配效应的建模复杂度仅随通道数的增加而线性增长, 从而将 M 维模型复杂度降至与二维模型相当. Luo 等^[127] 对该方案进行了改进, 将使用的多项式基函数替换为分段模型基函数, 增强了模型的稳定性.

此外, 在全数字架构中, 还有一些关于数字预失真算法方面的工作. 文献 [128] 提出了一种基于闭环的解相关算法和低带宽观测的预失真模型参数估计方法. 为了降低模型阶数, Yao 等^[129] 提出可以将迫零预编码和预失真模块级联, 同时自适应迭代计算信道矩阵并进行预失真补偿, 而 Yu 等^[130] 则提出使用两级预失真模块简化传统的预失真算法, 针对每通道功放配置的微调模型能够将各通道功放的非线性特征调整成一致的, 利用公用模型则可以直接线性化所有功放.

3.4.2 混合架构发射机的数字预失真技术

如前所述, 混合波束成形架构在毫米波大规模 MIMO 系统中被广泛采用, 在此背景下, 数字预失真的研究成为一个热门话题. 在混合和模拟波束成形架构中, 一路数字信号同时驱动多个可移相的相位发射分支, 两种架构中的数字预失真方案具有相似性. 由于混合或相控阵发射机中数字流的数量远

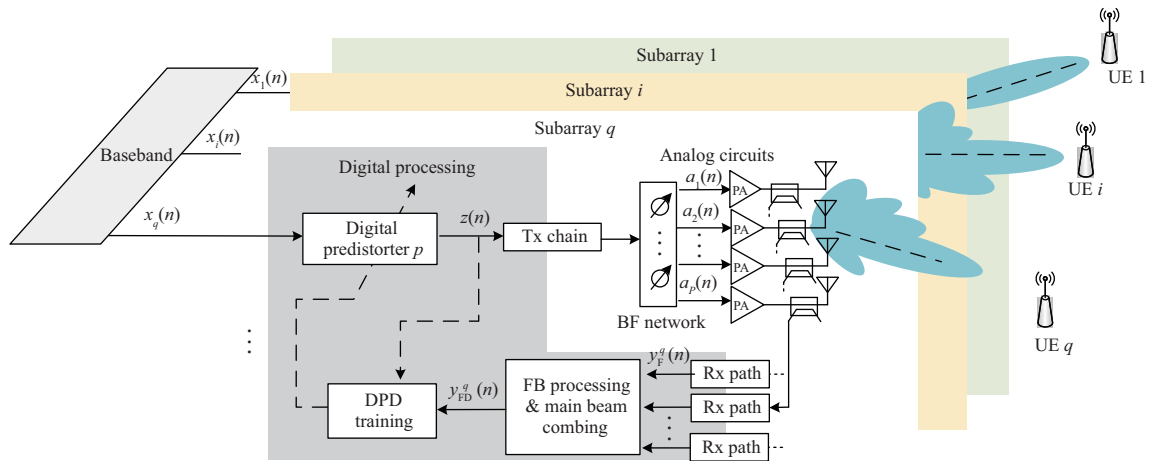


图 10 (网络版彩图) BO-DPD 架构原理框图

Figure 10 (Color online) Principle block diagram of BO-DPD architecture

小于功放数量,为每个功放配置一个独立预失真器的传统方案实际上是不可行的,在这种情况下,预失真器与功放的数量关系从“一对一”转变为“一对多”,若阵列功放具有相似的非线性失真特性,则传统数字预失真方案仍然可以保持较满意的线性化性能.然而,由于阵列天线互耦、波束控制相关的负载调制效应、功率控制机制以及其他非理想因素(如制造误差和老化)的影响,阵列中功放通常表现出不同的非线性特性.因此,使用一个预失真器几乎无法同时线性化所有功放.

针对混合或相控阵发射机的数字预失真问题,2016年前后开始出现相关的研究工作.早期阶段的文章通过一些理想的假设简化了实现问题.2016年,Liu等^[131]提出了一种简便的“single DPD”方案,该方案假设阵列中的功放是相似的,可以通过观察阵列中一个功放的非线性失真,提取该功放的预失真器模型,并将该模型应用于阵列中剩余的功放的线性化.“single DPD”方法易于实现,然而,实际系统中由于要实现不同阵列单元的功率控制,很难保证阵列功放的相似性,该方案性能下降明显.同样地,Yan等^[132]也假设阵列中的所有功放相似,但该方案对功放的组合响应进行线性化,而Lee等^[133]则针对该场景中预失真器识别算法进行了研究.

2018年前后,更多的研究者致力于解决混合架构大规模MIMO发射机的线性化的问题,并提出了一类具有广阔应用前景的数字预失真技术——空域数字预失真.在空域数字预失真中,线性化目标是发射阵列的主波束信号或用户接收信号,而非传统预失真方案校正的单个功放.2017年,Tervo等^[134]提出对相控阵中多个功放的合成响应进行线性化,但该方案的验证仅局限于8单元和16单元小规模阵列的仿真.2018年,清华大学Liu等^[135]和芬兰University of Tampere的Abdelaziz等^[136]同时提出了面向波束的数字预失真方案(beam-oriented digital predistortion, BO-DPD).图10给出了BO-DPD技术的架构框图,该方案根据采集的功放输出和实时波束成形系数合成“虚拟的”波束信号,并对其进行线性化,提取预失真器模型.文献^[135]通过64单元大规模阵列仿真和4通道实验测试验证了BO-DPD方案的有效性,相较于传统数字预失真方案,BO-DPD将主波束方向信号线性度改善6~7 dB以上.随后,Liu等^[137,138]将BO-DPD方案扩展到基于全连接架构的混合波束成形发射机中,提出了面向多波束的多流空域校正技术.

BO-DPD方案作为空域数字预失真技术的雏形,一经提出就受到了学术界和工业界的广泛关注,也吸引了许多研究者投入到空域数字预失真的相关研究中.空域数字预失真技术的研究可以分为3个

阶段,最初的一些工作致力于波束信号非线性模型表征和预失真配置,假设的功放工作环境和预失真系统架构较为理想.例如,BO-DOD技术仍然假设存在每个功放独立的反馈通道,能够利用耦合器直接获得所有功放的输出信号.然而,这种理想的反馈架构造价昂贵、结构臃肿,造成了很大的成本压力,很难在集成大规模MIMO系统中实现.因此,解决反馈架构配置问题是空域数字预失真发展第2阶段的研究重点.

根据反馈对象不同,反馈架构配置方案可以归纳为两类:(a)“器件级”的功放后端反馈和(b)“系统级”的空域响应(over-the-air, OTA)反馈方案.“器件级”的反馈方案是传统反馈方案的一种延伸,它仍然从功放的输出端获得反馈信号.2020年,Liu等^[139]提出了一种功率可扩展的单通道反馈BO-DPD技术(power scalable beam-oriented digital predistortion, PSBO-DPD),该方案假设阵列功放具有相似性,但由于工作功率等级不同表现出不同的非线性特性.因此,通过为阵列中一个观测功放配置反馈通道,即可采集功放在不同功率等级下的非线性特性.不同功率等级下的功放前向模型储存在预失真系统中,需要时可直接调用前向模型以合成波束信号,进行预失真器更新.另一方面,文献^[140]则提出了一种单路耦合线反馈装置,该方案利用一根长反馈线接入所有功放的输出端,同时耦合所有功放的合路信号.两种“器件级”反馈的方案各有利弊,PSBO-DPD方案反馈结构简单易于实现,但算法复杂度稍高,且线性化性能依赖于阵列功放的相似程度.单路耦合线反馈方案能够获得较为准确的功放输出信号特征,但需要较复杂的反馈通道校准,且算法性能受到反馈通道不理想性(响应不平坦、耦合线衰减大)因素的影响.

“系统级”空域反馈方案通过架设OTA天线采集阵列的空域响应作为反馈信号,根据反馈天线与发射阵列的距离不同,分为远场反馈和近场反馈两种方式.文献^[141~146]提出将反馈天线放置在发射阵列的远场区,便于直接采集波束信号作为反馈信号.在远场反馈方案中,预失真器的训练算法较为简便直观,然而,由于反馈天线需要位于发射阵列甚至发射机外部的远场区,非常不利于设备的小型化、集成化.与之相对的,近场反馈方案中OTA接收天线可以集成在发射阵列中,符合通信系统集成化的发展趋势^[147~149].由于近场耦合得到的反馈信号和阵列波束信号的非线性特征不完全一致,为了从反馈信号中恢复远场波束信号,近场反馈方案通常需要配合信号处理算法.

随着空域数字预失真架构的逐渐成熟,研究者开始关注它工作时面临的实际问题.由于天线互耦的存在,当发射阵列的波束方向改变时,天线阻抗(即功放输出阻抗)发生变化,导致功放的非线性特性改变^[150~153].因此,当波束扫描以实现用户跟踪时,预失真器模型的更新非常频繁,造成极大的计算资源开销.针对这一问题,文献^[130,154]通过功放前预置APD(analog predistortion)模块、控制功放偏置等电路层面的调节手段,使功放的状态相同,从而实现空域全方向的线性化.文献^[155]利用神经网络对多波束方向的信号进行整体建模,从而保证波束扫描在一定范围内时预失真器模型都是适用的.文献^[156]则利用聚类算法将非线性特征相似的波束方向进行归类,一类特征提取一个预失真器模型,从而降低模型更新速率.有源天线阵列的实时线性化仍留有許多尚未解决的问题,是空域数字预失真技术第3阶段发展的重点方向.

3.5 数字预失真发展新方向:与人工智能/深度学习相结合

近年来,6G技术在全球范围内掀起了新一轮研究热潮,与人工智能、深度学习相结合也成为了数字预失真技术发展的新方向.人工神经网络具有可以精确对非线性函数进行拟合的优点,所以适合于功率放大器的行为建模.国内外有许多专家学者对人工神经网络表现出极高的兴趣,近几年,利用人工神经网络来对功率放大器进行非线性建模也成为了一个极有热度的课题.前向神经网络(feed-forward neural network, FFNN)和实值神经网络(real-valued neural network, RVNN)在早期曾被用于功放行

为建模^[157,158],然而,随着通信信号制式的演进,射频功放表现出强记忆效应和复杂的动态失真特性,这些网络不再能精确地对功放进行建模。

在这一背景下,人们采用时延神经网络(time-delay neural network, TDNN)、实值时延神经网络(real-valued time-delay neural network, RVTDNN)、循环神经网络(recurrent neural network, RNN)和径向基网络(radial basis function, RBF)等网络对具有记忆效应的功放来进行建模^[66,159~161]。Liu等^[66]提出了基于实值时延神经网络(RVTDNN)的功放建模和预失真方法,并利用反向传播算法作为网络训练算法,有效补偿功放的强记忆效应非线性失真。循环神经网络具有记忆性,能够用于描述射频功率放大器的记忆效应,因此,Luongvinh和Kwon^[160]将循环神经网络(RNN)引入到功放建模和预失真校正过程中。

新的网络结构兴起,对数字预失真研究也有了新的影响。Liu等^[162]利用长短时记忆网络(long short-term memory, LSTM)来对宽带Doherty PA的非线性进行补偿。Li等^[163]使用函数链神经网络(FLNN)对PA建模,他们使用复数域切比雪夫(Chebyshev)多项式作为神经网络输入,相比于传统实值神经网络,函数链神经网络收敛快,计算复杂度低,ACPR指标提高了6 dB左右。Hu等^[164]利用卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)来对宽带功率放大器进行行为建模和预失真校正。他们巧妙地将一维信号数据转化为二维数据,使得卷积神经网络能够移植到DPD领域,从而可以利用到卷积网络的优点,大幅度减小了系数个数,降低了训练复杂度。

除了对单一PA进行行为建模,还有学者在DPD的其他领域应用神经网络。Brihuega等^[155]利用神经网络进行暴力优化全方向,他们使用深度神经网络来训练各个波束方向的信号,从而实现了使用单一DPD模块来对不同方向的波束进行线性化的目的。Jaraut等^[99]利用人工神经网络来解决多通道发射机的I/Q信号不平衡问题和串扰问题,在通道数大幅增加的情况下,相比于传统方法,该方案能够有效改善串扰问题,同时所需的系数数量大幅下降。

4 结语

无线通信技术的飞速发展人们的生活带来了日新月异的变化,未来的通信系统将朝着绿色环保、集成高效、智能互联的方向持续发展。射频功率放大器作为通信系统中最耗能的器件之一,其效率、功率、线性等指标在决定发射机性能方面起着关键性的作用,也将在无线通信的演进中扮演重要的角色。在新型发射机架构、调制体制下功放的性能指标需求不断攀升,也将促进以数字预失真技术为代表的功放线性化技术的发展和應用。结合数字预失真技术的基本原理和技术框架,本文回顾了数字预失真技术三十年的发展历程,总结了数字预失真发展过程中的重要阶段和不同时期的关键技术特征。随着无线通信向6G时代迈进,系统网络将进一步集成通信、感知、互联等功能,允许利用5G的密集蜂窝基础设施来构建感知网络。新的通信设备形态将催生新的功放设计架构和效率提升技术,线性度需求更加严苛,数字预失真等功放线性化技术也将具备更加广阔的应用空间、重要的研究价值和全新的技术挑战。

参考文献

- 1 Katz A, Wood J, Chokola D. The evolution of PA linearization: from classic feedforward and feedback through analog and digital predistortion. *IEEE Microw*, 2016, 17: 32–40
- 2 Xiao M. Novel predistortion techniques for RF power amplifiers. Dissertation for Ph.D. Degree, Birmingham: University of Birmingham, 2009

- 3 Raab F H. Class-E, Class-C, and Class-F power amplifiers based upon a finite number of harmonics. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2001, 49: 1462–1468
- 4 Raab F H, Asbeck P, Cripps S, et al. Power amplifiers and transmitters for RF and microwave. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2002, 50: 814–826
- 5 Wang D H, Chen W H, Chen X F, et al. A broadband millimeter-wave continuous-mode class-f power amplifier based on the deembedded transistor model. *IEEE Microw Wireless Compon Lett*, 2020, 30: 609–612
- 6 Kimball D F, Jeong J, Hsia C, et al. High-efficiency envelope-tracking W-CDMA base-station amplifier using GaN HFETs. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2006, 54: 3848–3856
- 7 Birafane A, El-Asmar M, Kouki A, et al. Analyzing LINC systems. *IEEE Microw*, 2010, 11: 59–71
- 8 Yao J, Long S I. Power amplifier selection for LINC applications. *IEEE Trans Circ Syst II*, 2006, 53: 763–767
- 9 Camarchia V, Pirola M, Quaglia R, et al. The Doherty power amplifier: review of recent solutions and trends. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2015, 63: 559–571
- 10 Chen W H, Lv G S, Liu X, et al. Doherty PAs for 5G massive MIMO: energy-efficient integrated DPA MMICs for sub-6-GHz and mm-Wave 5G massive MIMO systems. *IEEE Microw*, 2020, 21: 78–93
- 11 Chen X F, Chen W H, Ghannouchi F M, et al. A broadband Doherty power amplifier based on continuous-mode technology. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2016, 64: 4505–4517
- 12 Chen W H, Chen X F, Wang Z H. Broadband doherty power amplifier and linearization. In: *Proceedings of the 46th European Microwave Conference (EuMC)*, 2016. 961–964
- 13 Li S, Han J, Yang Z. Study on linearization method for power amplifier based on digital predistortion technology. *Electron Meas Technol*, 2020, 43: 132–136
- 14 Ku H, McKinley M D, Kenney J S. Quantifying memory effects in RF power amplifiers. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2002, 50: 2843–2849
- 15 Vuolevi J H K, Rahkonen T, Manninen J P A. Measurement technique for characterizing memory effects in RF power amplifiers. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2001, 49: 1383–1389
- 16 Kong X W. Model and processing algorithm research of digital predistortion for power amplifier. Dissertation for Ph.D. Degree. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013 [孔潇维. 功放数字预失真模型与处理算法研究. 博士学位论文. 成都: 电子科技大学, 2013]
- 17 Li H M. Research on linearization of beamforming system and neural-network-based broadband digital predistortion. Dissertation for Ph.D. Degree. Hefei: University of Science and Technology of China, 2021 [李泓旻. 波束成形系统线性化与基于神经网络的宽带数字预失真研究. 博士学位论文. 合肥: 中国科学技术大学, 2021]
- 18 Ghannouchi F M, Hammi O. Behavioral modeling and predistortion. *IEEE Microw*, 2009, 10: 52–64
- 19 Saleh A A M, Salz J. Adaptive linearization of power amplifiers in digital radio systems. *Bell Syst Technical J*, 1983, 62: 1019–1033
- 20 Nagata Y. Linear amplification technique for digital mobile communications. In: *Proceedings of the 39th Vehicular Technology Conference*, 1989. 159–164
- 21 Minowa M, Onoda M, Fukuda E, et al. Backoff improvement of an 800-MHz GaAs FET amplifier for a QPSK transmitter using an adaptive nonlinear distortion canceller. In: *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Vehicular Technology*, 1990
- 22 Mansell A, Bateman A. Practical implementation issues for adaptive predistortion transmitter linearisation. In: *Proceedings of IEE Colloquium on Linear RF Amplifiers and Transmitters*, 1994
- 23 Faulkner M, Mattsson T, Yates W. Adaptive linearisation using pre-distortion. In: *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Vehicular Technology*, 1990. 35–40
- 24 Cavers J K. A linearizing predistorter with fast adaptation. In: *Proceedings of the 40th IEEE Conference on Vehicular Technology*, 1990. 41–47
- 25 Cavers J K. Amplifier linearization using a digital predistorter with fast adaptation and low memory requirements. *IEEE Trans Veh Technol*, 1990, 39: 374–382
- 26 Gilabert P L. Multi look-up table digital predistortion for RF power amplifier linearization. Dissertation for Ph.D.

- Degree. Barcelona: Universitat Politecnica de Catalunya, 2007
- 27 Schreurs D, O'Droma M, Goacher A A, et al. RF Power Amplifier Behavioral Modeling. New York: Cambridge University Press, 2009
 - 28 Saleh A A M. Frequency-independent and frequency-dependent nonlinear models of TWT amplifiers. *IEEE Trans Commun*, 1981, 29: 1715–1720
 - 29 Thomas C, Weidner M, Durrani S. Digital amplitude-phase keying with M-ary alphabets. *IEEE Trans Commun*, 1974, 22: 168–180
 - 30 Hetrakul P, Taylor D. Compensators for bandpass nonlinearities in satellite communications. *IEEE Trans Aerosp Electron Syst*, 1976, 12: 509–514
 - 31 Berman A, Mahle C. Nonlinear phase shift in traveling-wave tubes as applied to multiple access communications satellites. *IEEE Trans Commun*, 1970, 18: 37–48
 - 32 Li M Y. Study on behavioral modeling and predistortion techniques for power amplifiers in broadband communications. Dissertation for Ph.D. Degree. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009 [李明玉. 宽带通信中功率放大器行为模型与预失真技术研究. 博士学位论文. 成都: 电子科技大学, 2009]
 - 33 Cunha T R, Pedro J C. Short and long-term memory modelling via generic fir filtering. In: *Proceedings of International Workshop on Integrated Nonlinear Microwave and Millimeter-Wave Circuits*, 2006. 146–149
 - 34 Liu Y J. Single-band and 2-dimensional dual-band digital predistortion techniques and models. Dissertation for Ph.D. Degree. Beijing: Tsinghua University, 2013 [刘友江. 单频及二维双频数字预失真新技术和新模型研究. 博士学位论文. 北京: 清华大学, 2013]
 - 35 Brinkhoff J, Parker A E. Charge trapping and intermodulation in HEMTs. In: *Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2004. 799–802
 - 36 Rathmell J G, Parker A E. Contribution of self heating to intermodulation in FETs. In: *Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2004. 803–806
 - 37 Brinkhoff J, Parker A E. Effect of baseband impedance on FET intermodulation. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2003, 51: 1045–1051
 - 38 de Carvalho N B, Pedro J C. A comprehensive explanation of distortion sideband asymmetries. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2002, 50: 2090–2101
 - 39 Kang H W, Cho Y S, Youn D H. Adaptive precompensation of Wiener systems. *IEEE Trans Signal Process*, 1998, 46: 2825–2829
 - 40 Ding L, Raich R, Zhou G T. A Hammerstein predistortion linearization design based on the indirect learning architecture. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 2002. 2689–2692
 - 41 Tan A H. Wiener-Hammerstein modeling of nonlinear effects in bilinear systems. *IEEE Trans Autom Control*, 2006, 51: 648–652
 - 42 Martin S. *The Volterra and Wiener Theories of Nonlinear System*. New York: Wiley, 1980
 - 43 Biglieri E, Barberis S, Catena M. Analysis and compensation of nonlinearities in digital transmission systems. *IEEE J Sel Areas Commun*, 1988, 6: 42–51
 - 44 Ding L, Zhou G T, Morgan D R, et al. A robust digital baseband predistorter constructed using memory polynomials. *IEEE Trans Commun*, 2004, 52: 159–165
 - 45 Morgan D R, Ma Z, Kim J, et al. A generalized memory polynomial model for digital predistortion of RF power amplifiers. *IEEE Trans Signal Process*, 2006, 54: 3852–3860
 - 46 Zhu A, Pedro J C, Brazil T J. Dynamic deviation reduction-based volterra behavioral modeling of RF power amplifiers. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2006, 54: 4323–4332
 - 47 Zhu A D, Draxler P J, Yan J J, et al. Open-loop digital predistorter for RF power amplifiers using dynamic deviation reduction-based Volterra series. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2008, 56: 1524–1534
 - 48 Hammi O, Ghannouchi F M, Vassilakis B. A compact envelope-memory polynomial for RF transmitters modeling with application to baseband and RF-digital predistortion. *IEEE Microw Wireless Compon Lett*, 2008, 18: 359–361

- 49 Ding L, Zhou G T. Effects of even-order nonlinear terms on power amplifier modeling and predistortion linearization. *IEEE Trans Veh Technol*, 2004, 53: 156–162
- 50 Ding L, Ma Z X, Morgan D R, et al. A least-squares/Newton method for digital predistortion of wideband signals. *IEEE Trans Commun*, 2006, 54: 833–840
- 51 Hammi O, Ghannouchi F M. Twin nonlinear two-box models for power amplifiers and transmitters exhibiting memory effects with application to digital predistortion. *IEEE Microw Wireless Compon Lett*, 2009, 19: 530–532
- 52 Younes M, Hammi O, Kwan A, et al. An accurate complexity-reduced “PLUME” model for behavioral modeling and digital predistortion of RF power amplifiers. *IEEE Trans Ind Electron*, 2011, 58: 1397–1405
- 53 Liu T J, Boumaiza S, Ghannouchi F M. Deembedding static nonlinearities and accurately identifying and modeling memory effects in wide-band RF transmitters. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2005, 53: 3578–3587
- 54 Liu T J, Boumaiza S, Ghannouchi F M. Augmented hammerstein predistorter for linearization of broad-band wireless transmitters. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2006, 54: 1340–1349
- 55 Moon J, Kim B. Enhanced Hammerstein behavioral model for broadband wireless transmitters. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2011, 59: 924–933
- 56 Chua L O, Deng A C. Canonical piecewise-linear representation. *IEEE Trans Circ Syst*, 1988, 35: 101–111
- 57 Zhu A. Decomposed vector rotation-based behavioral modeling for digital predistortion of RF power amplifiers. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2015, 63: 737–744
- 58 Zhu A. Behavioral modeling for digital predistortion of RF power amplifiers: from Volterra series to CPWL functions. In: *Proceedings of IEEE Topical Conference on Power Amplifiers for Wireless and Radio Applications (PAWR)*, 2016. 1–4
- 59 Cao W H, Zhu A D. A modified decomposed vector rotation-based behavioral model with efficient hardware implementation for digital predistortion of RF power amplifiers. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2017, 65: 2443–2452
- 60 Mateo C, Carro P L, Garcia-Ducar P, et al. Digital predistortion based on B-spline CPWL models in a RoF LTE mobile fronthaul. In: *Proceedings of the 47th European Microwave Conference (EuMC)*, 2017. 1136–1139
- 61 Li Y, Cao W H, Zhu A D. Instantaneous sample indexed magnitude-selective affine function-based behavioral model for digital predistortion of RF power amplifiers. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2018, 66: 5000–5010
- 62 Cai J, King J B. Behavioral model of RF PAs including load mismatch effects based on canonical section-wise piecewise-linear function. *IEEE Access*, 2020, 8: 9469–9479
- 63 Lu Q Y, Meng F, Guo Y, et al. A modified decomposed vector rotation behavioral model for concurrent dual-band envelope tracking RF power amplifiers. In: *Proceedings of IEEE Asia Pacific Microwave Conference (APMC)*, 2017. 264–267
- 64 Zhai J F, Zhang L, Yu Z Q, et al. A modified canonical piecewise-linear function-based behavioral model for wideband power amplifiers. *IEEE Microw Wireless Compon Lett*, 2016, 26: 195–197
- 65 Zhai J F, Li Y, Yu C, et al. A band-limited canonical piecewise-linear function-based behavioral model for wideband power amplifiers. *IEEE Microw Wireless Compon Lett*, 2017, 27: 1022–1024
- 66 Liu T J, Boumaiza S, Ghannouchi F M. Dynamic behavioral modeling of 3G power amplifiers using real-valued time-delay neural networks. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2004, 52: 1025–1033
- 67 Isaksson M, Wisell D, Ronnow D. Wide-band dynamic modeling of power amplifiers using radial-basis function neural networks. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2005, 53: 3422–3428
- 68 Rawat M, Rawat K, Ghannouchi F M. Adaptive digital predistortion of wireless power amplifiers/transmitters using dynamic real-valued focused time-delay line neural networks. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2010, 58: 95–104
- 69 Mkaem F, Boumaiza S. Physically inspired neural network model for RF power amplifier behavioral modeling and digital predistortion. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2011, 59: 913–923
- 70 Rawat M, Ghannouchi F M. Distributed spatiotemporal neural network for nonlinear dynamic transmitter modeling and adaptive digital predistortion. *IEEE Trans Instrum Meas*, 2012, 61: 595–608
- 71 Rawat M, Ghannouchi F M. A mutual distortion and impairment compensator for wideband direct-conversion transmitters using neural networks. *IEEE Trans Broadcast*, 2012, 58: 168–177

- 72 Roblin P, Quindroit C, Naraharisetti N, et al. Concurrent linearization: the state of the art for modeling and linearization of multiband power amplifiers. *IEEE Microw*, 2013, 14: 75–91
- 73 Bassam S A, Chen W H, Helaoui M, et al. Transmitter architecture for CA: carrier aggregation in LTE-advanced systems. *IEEE Microw*, 2013, 14: 78–86
- 74 Roblin P, Myoung S K, Chaillot D, et al. Frequency-selective predistortion linearization of RF power amplifiers. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2008, 56: 65–76
- 75 Cidronali A, Magrini I, Fagotti R, et al. A new approach for concurrent dual-band IF digital predistortion: system design and analysis. In: *Proceedings of Workshop on Integrated Nonlinear Microwave and Millimetre-wave Circuits*, 2008. 127–130
- 76 Bassam S A, Helaoui M, Ghannouchi F M. 2-D digital predistortion (2-D-DPD) architecture for concurrent dual-band transmitters. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2011, 59: 2547–2553
- 77 Bassam S A, Chen W H, Helaoui M, et al. Linearization of concurrent dual-band power amplifier based on 2D-DPD technique. *IEEE Microw Wireless Compon Lett*, 2011, 21: 685–687
- 78 Chen W H, Bassam S A, Li X, et al. Design and linearization of concurrent dual-band doherty power amplifier with frequency-dependent power ranges. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2011, 59: 2537–2546
- 79 Liu Y J, Chen W H, Zhou J, et al. Digital predistortion for concurrent dual-band transmitters using 2-D modified memory polynomials. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2013, 61: 281–290
- 80 Liu Y J, Chen W H, Zhou B, et al. 2D augmented Hammerstein model for concurrent dual-band power amplifiers. *Electron Lett*, 2012, 48: 1214–1216
- 81 Zhang S L, Chen W H, Ghannouchi F M, et al. An iterative pruning of 2-D digital predistortion model based on normalized polynomial terms. In: *Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT)*, 2013
- 82 Naraharisetti N, Roblin P, Quindroit C, et al. Efficient least-squares 2-D-cubic spline for concurrent dual-band systems. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2015, 63: 2199–2210
- 83 Yang G, Liu F L, Li L L, et al. 2D orthogonal polynomials for concurrent dual-band digital predistortion. In: *Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT)*, 2013
- 84 Zhai J F, Wu S, Zhang L, et al. A 2-D-canonical piecewise linear function-based behavioral model for concurrent dual-band power amplifiers. *IEEE Microw Wireless Compon Lett*, 2018, 28: 1050–1052
- 85 Liu Y J, Chen W H, Zhou J, et al. Joint predistortion of IQ impairments and PA nonlinearity in concurrent dual-band transmitters. In: *Proceedings of the 42nd European Microwave Conference*, 2012. 132–135
- 86 Younes M, Ghannouchi F M. On the modeling and linearization of a concurrent dual-band transmitter exhibiting nonlinear distortion and hardware impairments. *IEEE Trans Circ Syst I*, 2013, 60: 3055–3068
- 87 Rawat M, Rawat K, Younes M, et al. Joint mitigation of nonlinearity and modulator imperfections in dual-band concurrent transmitter using neural networks. *Electron Lett*, 2013, 49: 253–255
- 88 Younes M, Kwan A, Rawat M, et al. Three-dimensional digital predistorter for concurrent tri-band power amplifier linearization. In: *Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT)*, 2013
- 89 Kwan A K, Bassam S A, Helaoui M, et al. Concurrent dual band digital predistortion using look up tables with variable depths. In: *Proceedings of IEEE Topical Conference on Power Amplifiers for Wireless and Radio Applications*, 2013
- 90 Ding L, Yang Z G, Gandhi H. Concurrent dual-band digital predistortion. In: *Proceedings of IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2012
- 91 Naraharisetti N, Quindroit C, Roblin P, et al. 2D cubic spline implementation for concurrent dual-band system. In: *Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT)*, 2013
- 92 Quindroit C, Naraharisetti N, Roblin P, et al. Concurrent dual-band digital predistortion for power amplifier based on orthogonal polynomials. In: *Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT)*, 2013
- 93 Quindroit C, Naraharisetti N, Roblin P, et al. FPGA implementation of orthogonal 2D digital predistortion system for concurrent dual-band power amplifiers based on time-division multiplexing. *IEEE Trans Microw Theory Tech*,

- 2013, 61: 4591–4599
- 94 Bassam S A, Helaoui M, Ghannouchi F M. Crossover digital predistorter for the compensation of crosstalk and nonlinearity in MIMO transmitters. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2009, 57: 1119–1128
- 95 Saffar D, Boulejfen N, Ghannouchi F M, et al. Behavioral modeling of MIMO nonlinear systems with multivariable polynomials. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2011, 59: 2994–3003
- 96 Abdelhafiz A, Behjat L, Ghannouchi F M, et al. A high-performance complexity reduced behavioral model and digital predistorter for MIMO systems with crosstalk. *IEEE Trans Commun*, 2016, 64: 1996–2004
- 97 Vaezi A, Abdipour A, Mohammadi A, et al. On the modeling and compensation of backward crosstalk in MIMO transmitters. *IEEE Microw Wireless Compon Lett*, 2017, 27: 842–844
- 98 Khan Z A, Zenteno E, Handel P, et al. Digital predistortion for joint mitigation of I/Q imbalance and MIMO power amplifier distortion. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2017, 65: 322–333
- 99 Jaraut P, Rawat M, Ghannouchi F M. Composite neural network digital predistortion model for joint mitigation of crosstalk, I/Q imbalance, nonlinearity in MIMO transmitters. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2018, 66: 5011–5020
- 100 Suryasarman P M, Springer A. A comparative analysis of adaptive digital predistortion algorithms for multiple antenna transmitters. *IEEE Trans Circ Syst I*, 2015, 62: 1412–1420
- 101 Suryasarman P, Springer A. Adaptive digital pre-distortion for multiple antenna transmitters. In: *Proceedings of IEEE Global Conference on Signal and Information Processing*, 2013
- 102 Amin S, Landin P N, Handel P, et al. Behavioral modeling and linearization of crosstalk and memory effects in RF MIMO transmitters. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2014, 62: 810–823
- 103 Qian H, Cheng X, Luo X L, et al. Calibration of nonlinear crosstalk in MIMO transmitter. *IEEE Trans Veh Technol*, 2016, 66: 3739–3748
- 104 Cao H Y, Nemati H M, Tehrani A S, et al. Linearization of efficiency-optimized dynamic load modulation transmitter architectures. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2010, 58: 873–881
- 105 Cao H Y, Nemati H M, Tehrani A S, et al. Digital predistortion for high efficiency power amplifier architectures using a dual-input modeling approach. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2012, 60: 361–369
- 106 Al-Kanan H, Li F, Tafuri F F. Comparison of 2-D behavioral models for modeling and digital predistortion of envelope tracking power amplifiers. In: *Proceedings of IEEE Asia Pacific Microwave Conference (APMC)*, 2017. 999–1002
- 107 Hammi O, Khalifa M O, Abdelhafiz A, et al. A dual-input two-box model for digital predistortion of envelope tracking power amplifiers. *IEEE Microw Wireless Compon Lett*, 2016, 26: 361–363
- 108 Lu Q Y, Meng F, Yang N, et al. A uniform digital predistorter for concurrent multiband envelope tracking RF power amplifiers with different envelopes. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2018, 66: 3947–3957
- 109 Lin Y Q, Quindroit C, Jang H, et al. 3-D fourier series based digital predistortion technique for concurrent dual-band envelope tracking with reduced envelope bandwidth. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2015, 63: 2764–2775
- 110 Gilabert P L, Montoro G, López D, et al. 3D digital predistortion for dual-band envelope tracking power amplifiers. In: *Proceedings of Asia-Pacific Microwave Conference Proceedings (APMC)*, 2013. 734–736
- 111 Jaraut P, Rawat M. 3D generalized coefficient supported model for concurrent dual-band digital predistortion of envelope tracking power amplifier. In: *Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave and RF Conference (IMaRC)*, 2017
- 112 Zhu A D, Draxler P J, Hsia P J C, et al. Digital predistortion for envelope-tracking power amplifiers using decomposed piecewise volterra series. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2008, 56: 2237–2247
- 113 Yu C, Guan L, Zhu E N, et al. Band-limited volterra series-based digital predistortion for wideband RF power amplifiers. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2012, 60: 4198–4208
- 114 Yu C, Guan L, Zhu A D. Band-limited volterra series-based behavioral modeling of RF power amplifiers. In: *Proceedings of IEEE/MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2012. 1–3
- 115 Zhang S, Chen W, Feng Z. Low sampling rate digital predistortion of power amplifier assisted by bandpass RF filter. In: *Proceedings of Asia Pacific Microwave Conference Proceedings*, 2012. 962–964
- 116 Ding L, Mujica F, Yang Z. Digital predistortion using direct learning with reduced bandwidth feedback. In: Pro-

- ceedings of IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT), 2013. 1–3
- 117 Liu Y, Pan W S, Shao S H, et al. A new digital predistortion for wideband power amplifiers with constrained feedback bandwidth. *IEEE Microw Wireless Compon Lett*, 2013, 23: 683–685
- 118 Wang Z H, Chen W H, Su G Z, et al. Low feedback sampling rate digital predistortion for wideband wireless transmitters. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2016, 64: 3528–3539
- 119 Su G Z, Chen W H, Zhang S L, et al. A robust and low sampling rate digital predistortion algorithm for broadband PA modeling and predistortion. In: *Proceedings of Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON)*, 2014. 1–4
- 120 Liu Y, Pan W S, Shao S H, et al. A new digital predistortion using indirect learning with constrained feedback bandwidth for wideband power amplifiers. In: *Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2014)*, 2014. 1–3
- 121 Zhang Q, Liu Y J, Zhou J, et al. A band-divided memory polynomial for wideband digital predistortion with limited bandwidth feedback. *IEEE Trans Circ Syst II*, 2015, 62: 922–926
- 122 Ma Y, Yamao Y, Akaiwa Y, et al. Wideband digital predistortion using spectral extrapolation of band-limited feedback signal. *IEEE Trans Circ Syst I*, 2014, 61: 2088–2097
- 123 Liu Y J, Yan J J, Dabag H T, et al. Novel technique for wideband digital predistortion of power amplifiers with an under-sampling ADC. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2014, 62: 2604–2617
- 124 Hausmair K, Gustafsson S, Sanchez-Perez C, et al. Prediction of nonlinear distortion in wideband active antenna arrays. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2017, 65: 4550–4563
- 125 Hausmair K, Landin P N, Gustavsson U, et al. Digital predistortion for multi-antenna transmitters affected by antenna crosstalk. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2018, 66: 1524–1535
- 126 Barradas F M, Tome P M, Gomes J M, et al. Power, linearity, and efficiency prediction for MIMO arrays with antenna coupling. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2017, 65: 5284–5297
- 127 Luo Q, Yu C, Zhu X W. A dual-input canonical piecewise-linear function-based model for digital predistortion of multi-antenna transmitters. In: *Proceedings of IEEE/MTT-S International Microwave Symposium-IMS*, 2018. 559–562
- 128 Abdelaziz M, Anttila L, Valkama M. Reduced-complexity digital predistortion for massive MIMO. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2017. 6478–6482
- 129 Yao M, Sohul M, Nealy R, et al. A digital predistortion scheme exploiting degrees-of-freedom for massive MIMO systems. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Communications (ICC)*, 2018. 1–5
- 130 Yu C, Jing J X, Shao H, et al. Full-angle digital predistortion of 5G millimeter-wave massive MIMO transmitters. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2019, 67: 2847–2860
- 131 Liu L, Chen W H, Ma L Y, et al. Single-PA-feedback digital predistortion for beamforming MIMO transmitter. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT)*, 2016. 573–575
- 132 Yan H, Cabric D. Digital predistortion for hybrid precoding architecture in millimeter-wave massive MIMO systems. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP)*, 2017. 3479–3483
- 133 Lee S, Kim M, Sirl Y, et al. Digital predistortion for power amplifiers in hybrid MIMO systems with antenna subarrays. In: *Proceedings of the 81st Vehicular Technology Conference (VTC Spring)*, 2015. 1–5
- 134 Tervo N, Aikio J, Tuovinen T, et al. Digital predistortion of amplitude varying phased array utilising over-the-air combining. In: *Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, 2017. 1165–1168
- 135 Liu X, Zhang Q, Chen W H, et al. Beam-oriented digital predistortion for 5G massive MIMO hybrid beamforming transmitters. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2018, 66: 3419–3432
- 136 Abdelaziz M, Anttila L, Brihuega A, et al. Digital predistortion for hybrid MIMO transmitters. *IEEE J Sel Top Signal Process*, 2018, 12: 445–454
- 137 Liu X, Chen W H, Chu J M, et al. Multi-stream spatial digital predistortion for fully-connected hybrid beamforming

- massive MIMO transmitters. *IEEE Trans Circ Syst I*, 2021, 68: 2998–3011
- 138 Liu X, Chen W H, Chu J M. Behavioral modeling and digital predistortion for fully-connected hybrid beamforming massive MIMO transmitters. In: *Proceedings of IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*, 2020. 463–465
- 139 Liu X, Chen W H, Chen L, et al. Power scalable beam-oriented digital predistortion for compact hybrid massive MIMO transmitters. *IEEE Trans Circ Syst I*, 2020, 67: 4994–5006
- 140 Tervo N, Khan B, Kursu O, et al. Digital predistortion of phased-array transmitter with shared feedback and far-field calibration. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2021, 69: 1000–1015
- 141 Ng E, Beltagy Y, Mitran P, et al. Single-input single-output digital predistortion of power amplifier arrays in millimeter wave RF beamforming transmitters. In: *Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, 2018. 481–484
- 142 Ng E, Aayed A B, Mitran P, et al. Single-input single-output digital predistortion of multi-user RF beamforming arrays. In: *Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, 2019. 472–475
- 143 Ng E, Beltagy Y, Scarlato G, et al. Digital predistortion of millimeter-wave RF beamforming arrays using low number of steering angle-dependent coefficient sets. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2019, 67: 4479–4492
- 144 Luo Q, Zhu X W, Yu C, et al. Single-receiver over-the-air digital predistortion for massive MIMO transmitters with antenna crosstalk. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2020, 68: 301–315
- 145 Wang X Y, Li Y, Yu C, et al. Digital predistortion of 5G massive MIMO wireless transmitters based on indirect identification of power amplifier behavior with OTA tests. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2020, 68: 316–328
- 146 Wang X Y, Yu C, Li Y, et al. Real-time single channel over-the-air data acquisition for digital predistortion of 5G massive MIMO wireless transmitters. In: *Proceedings of IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS)*, Guangzhou, 2019
- 147 Hausmair K, Gustavsson U, Fager C, et al. Modeling and linearization of multi-antenna transmitters using over-the-air measurements. In: *Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS)*, Florence, 2018
- 148 Liu X, Chen W H, Chen L, et al. Beam-oriented digital predistortion for hybrid beamforming array utilizing over-the-air diversity feedbacks. In: *Proceedings of IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, 2019. 987–990
- 149 Liu X, Chen W H, Chen L, et al. Linearization for hybrid beamforming array utilizing embedded over-the-air diversity feedbacks. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2019, 67: 5235–5248
- 150 Fager C, Hausmair K, Buisman K, et al. Analysis of nonlinear distortion in phased array transmitters. In: *Proceedings of Integrated Nonlinear Microwave and Millimetre-wave Circuits Workshop (INMMiC)*, Graz, 2017
- 151 Fager C, Eriksson T, Barradas F, et al. Linearity and efficiency in 5G transmitters: new techniques for analyzing efficiency, linearity, and linearization in a 5G active antenna transmitter context. *IEEE Microw*, 2019, 20: 35–49
- 152 Dhar S K, Abdelhafiz A, Aziz M, et al. A reflection-aware unified modeling and linearization approach for power amplifier under mismatch and mutual coupling. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2018, 66: 4147–4157
- 153 Taghikhani P, Buisman K, Fager C. Hybrid beamforming transmitter modeling for millimeter-wave MIMO applications. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2020, 68: 4740–4752
- 154 Tervo N, Khan B, Aikio J P, et al. Combined sidelobe reduction and omnidirectional linearization of phased array by using tapered power amplifier biasing and digital predistortion. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2021, 69: 4284–4299
- 155 Brihuega A, Anttila L, Valkama M. Neural-network-based digital predistortion for active antenna arrays under load modulation. *IEEE Microw Wireless Compon Lett*, 2020, 30: 843–846
- 156 Yin H, Yu Z Q, Yu C, et al. Data-clustering-assisted digital predistortion for 5G millimeter-wave beamforming transmitters with multiple dynamic configurations. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2021, 69: 1805–1816
- 157 Zhang Q J, Gupta K C. *Neural Networks for RF and Microwave Design*. Norwood: Artech House, 2000
- 158 Ibukhla M, Sombria J, Castanie F, et al. Neural networks for modeling nonlinear memoryless communication channels. *IEEE Trans Commun*, 1997, 45: 768–771

- 159 Li M Y, He S B, Li X D. Complex radial basis function networks trained by QR-decomposition recursive least square algorithms applied in behavioral modeling of nonlinear power amplifiers. *Int J RF Microw Comp Aid Eng*, 2009, 19: 634–646
- 160 Luongvinh D, Kwon Y. A fully recurrent neural network-based model for predicting spectral regrowth of 3G handset power amplifiers with memory effects. *IEEE Microw Wireless Compon Lett*, 2006, 16: 621–623
- 161 Hui M, Liu T J, Ye Y, et al. Behavior modeling for multi-carrier multi-mode power amplifiers using real-valued time-delay RBF networks. In: *Proceedings of International Conference on Electronics Communications and Control (ICECC)*, Ningbo, 2011
- 162 Liu T J, Ye Y, Yin S Y, et al. Digital predistortion linearization with deep neural networks for 5G power amplifiers. In: *Proceedings of European Microwave Conference in Central Europe (EuMCE)*, 2019. 216–219
- 163 Li M Y, Liu J T, Jiang Y, et al. Complex-chebyshev functional link neural network behavioral model for broadband wireless power amplifiers. *IEEE Trans Microw Theory Tech*, 2012, 60: 1979–1989
- 164 Hu X, Liu Z J, Yu X F, et al. Convolutional neural network for behavioral modeling and predistortion of wideband power amplifiers. *IEEE Trans Neural Netw Learn Syst*, 2021, doi: 10.1109/TNNLS.2021.3054867

Digital predistortion: development trends and key techniques

Xin LIU, Wenhua CHEN*, Huibo WU & Zhenghe FENG

Department of Electronic Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China

* Corresponding author. E-mail: chenwh@tsinghua.edu.cn

Abstract The power amplifiers (PAs) are a key device in the wireless communication system, providing high efficiency while being the major source of nonlinear distortion. To alleviate the conflict between nonlinearity and efficiency, additional PA linearization techniques are used in transmitters. Among them, digital predistortion (DPD) has become the most popular linearization technique due to its outstanding advantages, including high precision, stability, and flexible configuration. This paper introduces the principle and key technologies of the DPD technique and summarizes the development trends and technical features of DPD in different development stages. In future communication systems, the DPD technique will be evolved to simultaneously improve compensation accuracy and reduce power consumption.

Keywords wireless communication, RF power amplifier, digital predistortion, behavioral modeling, development trends