

☒ 已思考 (用时 34 秒) >

记忆多项式之所以成为数字预失真 (DPD) 中最经典、最常用的模型,是因为它在**建模精度**、**参数提取难度**和**硬件可实现性**之间找到了极佳的平衡点。下面从“是什么”和“为什么”两个角度来展开。

一、什么是记忆多项式

在通信系统中,功率放大器 (PA) 的失真包含两部分:

1. **非线性**: 输出幅度/相位不再是输入幅度的线性函数,产生带内失真和频谱扩展。
2. **记忆效应**: 当前输出不仅依赖当前输入,还受过去输入的影响 (源于偏置电路、热效应、匹配网络等)。这在宽带信号下尤其明显。

单纯的“无记忆多项式”只对当前采样点做非线性变换:

$$y(n) = \sum_{k=1}^K a_k \cdot x(n) |x(n)|^{k-1}$$

它无法处理记忆效应。

而**记忆多项式模型**将其扩展为:

$$y(n) = \sum_{m=0}^M \sum_{k=1}^K a_{mk} \cdot x(n-m) |x(n-m)|^{k-1}$$

(为简化,通常只取 k 为奇数)

它相当于把不同延迟的输入信号分别做无记忆非线性处理然后求和。这样既刻画了每一“时刻”输入的非线性,又通过延迟项捕捉了时间上的记忆。

二、为何它能完美用于 DPD

DPD 的本质是在功放前放置一个逆向非线性的模块,使“预失真器 + PA”整体呈线性。记忆多项式之所以“能”并且“好用”,有以下几个核心原因。

1. 精确捕捉 PA 的非线性与记忆效应

记忆多项式其实是 **Volterra 级数**的精简对角化版本。完整的 Volterra 级数包含大量交叉项 (如 $x^*(n-1)x^2(n)$ 等),参数爆炸且很多项对实际 PA 贡献微弱。记忆多项式仅保留对角核,忽略交叉记忆项,而大量实测和理论表明,对角项承载了 PA 记忆效应的绝大部分能量。因此,它能高保真地模拟实际功放的 AM/AM、AM/PM 特性及其频率相关性。

2. 参数求解——天然的线性系统

在间接学习结构 (ILA) 或直接学习结构中, 需要从 PA 的输入输出数据反推预失真器的系数。注意到记忆多项式的输出 $y(n)$ 是关于系数 a_{mk} 的线性函数。基函数矩阵:

$$\Phi = \left[x(n-m) |x(n-m)|^{k-1} \right]$$

是确定的。我们可以直接用最小二乘 (LS) 一步求出最优系数:

$$\hat{\mathbf{a}} = (\Phi^H \Phi)^{-1} \Phi^H \mathbf{y}$$

这比那些输出与参数非线性的模型 (如神经网络) 在辨识上要简单、稳定得多, 也容易实现在线自适应。

3. 硬件实现非常经济

记忆多项式的结构是“延迟链 + 非线性函数 + 累加”:

- 每个延迟抽头都对应一个独立的、仅与本抽头输入幅度相关的查找表 (LUT)。
- 整个预失真器可视为一个多路 LUT 加 FIR 式的求和器, 不需要计算交叉乘积, 非常适合 FPGA/ASIC 实现, 吞吐率高、功耗低。

4. 复杂度与性能可灵活裁剪

通过选择记忆深度 M 和非线性阶数 K , 工程师可以在线性化性能与计算开销之间按需调整:

- 窄带信号 $\rightarrow M$ 小, K 可高;
- 宽带信号 (记忆效应强) \rightarrow 适当增加 M , 减少 K 。

这种可伸缩性让记忆多项式从早期的宏基站到今天的 5G 大规模 MIMO 发射机都能适用。

5. 求逆的自然兼容性

DPD 中, 预失真的特性应接近 PA 的“后逆” (post-inverse)。由于记忆多项式在模型阶数和记忆深度设置合理时, PA 的后逆本身仍可以用同结构的记忆多项式高精度逼近 (p-th 阶逆理论), 这保证了用同一结构既能做 PA 建模, 又能直接作为预失真器, 无需额外复杂的求逆运算。

三、一个直观对比

模型	能否处理记忆效应	参数数量	参数求解	硬件复杂度
无记忆多项式 (如 Rapp 模型)	✗	少	简单	极简
记忆多项式	✓	中等	最小二乘	简单
完整 Volterra 级数	✓	极多 (维度爆炸)	困难	几乎不可行
神经网络	✓	极多	复杂 (非凸优化)	高

记忆多项式恰好处在“有效但可解”的最佳点。

总结一句话：

记忆多项式用对角化的思想，保留了 Volterra 级数中对 PA 失真贡献最大的成分，参数与输出呈线性关系，既能准确描述宽带的非线性记忆效应，又方便用最小二乘法快速提取系数，且硬件实现极其友好，所以自然成为 DPD 的首选模型。