

数字预失真技术对行波管发射机信号质量的影响研究



杨 瑜^{1*}, 曾 辉¹, 朱 维¹, 唐 佳¹, 陈国斌¹, 来晋明^{1,2}

(1. 中国电子科技集团公司第二十九研究所 成都 610036; 2. 四川省宽带微波电路高密度集成工程研究中心 成都 610036)

【摘要】以数字预失真为代表的线性化技术,是提高大功率发射信号质量的重要手段。该文设计了一种数字预失真方案,研制了样机,并在 X 波段 100 W 行波管发射机上进行了实验验证,取得了对发射信号质量改善的效果:矢量误差模 (EVM) 从 8% 下降到 5%,三阶交调降低约 10 dB,变功率输入时通道间相位一致性改善约 10°,时域峰值-3 dB 宽度改善了 1.33 μ s。在此基础上,该文从时域、频域等角度分析了数字预失真技术对发射信号质量的改善作用。

关 键 词 幅幅调制; 幅相调制; 数字预失真; 线性化; 行波管发射机

中图分类号 TN92 **文献标志码** A **doi**:10.12178/1001-0548.2020352

Study on the Effect of Digital Predistortion on Signal Quality of Travelling-Wave Tube Transmitter

YANG Yu^{1*}, ZENG Hui¹, ZHU Wei¹, TANG Jia¹, CHEN Guobin¹, and LAI Jinming^{1,2}

(1. The 29th Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation Chengdu 610036;

2. Sichuan Province Engineering Research Center for Broadband Microwave Circuit High Density Integration Chengdu 610036)

Abstract The linearization technology represented by digital predistortion is an important means to improve the quality of high-power transmitting signals. In this paper, a digital predistortion scheme is designed. An experimental verification is carried out on X band, 100 W travelling-wave tube (TWT) transmitter, and the improvement effect on the signal quality is achieved: error vector magnitude (EVM) falls from 8% to 5%; third-order intermodulation is reduced about 10 dB; the consistency of phase between channels is improved about 10° with different input power level; the 3 dB width of amplitude in time domain is improved by 1.33 microseconds. On this basis, the effect of digital predistortion technology on the improvement of transmitted signal quality is analyzed from the perspectives of time domain and frequency domain.

Key words AM-AM; AM-PM; digital predistortion; linearization; TWT Transmitter

在大功率发射领域,由于微波功率放大器(发射机)的非线性特性,发射机的输出信号质量相对于输入信号有恶化的表现,具体体现为 AM-AM 效应、AM-PM 效应、三阶交调、谐波、多通道间的幅相一致性恶化、时域削峰现象等。为改善发射信号的失真,需采用线性化技术来提高发射信号的质量。常用的线性化技术主要有^[1]:功率回退、模拟预失真、数字预失真(digital predistortion, DPD)、前馈、动态偏置、包络消除与恢复(envelope elimination and restoration, EER)、非线性元件实现线性放大(linear amplifier using nonlinear components,

LINC)、笛卡尔反馈(Cartesian feedback)等。在这些方案中,数字预失真方案虽然较复杂、带宽较窄,但其效率高、非线性产物抑制能力强且自适应,应用较为普遍^[2-8]。

微波功率放大器中,行波管体制的发射机具有工作带宽宽、效率高、对环境温度变化不敏感等特点,因此,在电子对抗等领域获得了广泛的应用。但其在饱和放大区具有较强的非线性特性,因此,提高行波管发射机的线性化水平成为工程应用中的迫切需求。传统的数字预失真设计主要针对固态微波功率放大器,针对行波管体制的微波功率放大器

收稿日期:2020-09-14;修回日期:2021-05-26

作者简介:杨瑜(1979-),男,高级工程师,主要从事功率发射技术方面的研究。

*通信作者:杨瑜, E-mail: 19053123@qq.com

数字预失真设计较为少见。本文设计了一种数字预失真方案,研制了数字预失真样机,并在 X 波段 100 W 行波管发射机上进行实验验证。

1 预失真原理

本文对功放的建模采用了记忆多项式模型^[9-13],在该模型中,预失真器与功放的位置可以交换而不影响输出结果。图 1 所示的间接学习结构得到较广泛的应用。图中 Predistorter A 和 Predistorter B 是两个相同的预失真器,其结构、参数完全相同。该预失真器采用和功放同样的记忆多项式模型,该记忆多项式模型见式 (1),模拟功放对输入信号的非线性变换过程,如功放三阶交调的产生、功放的记忆效应等,且通过参数配置的差异,产生和功放相

反的非线性特性,从而抵消功放带来的非线性产物。 $x(n)$ 是系统输入信号, $z(n)$ 是系统输入信号经过 Predistorter B 处理后的输出,同时也是功放的输入信号, $y(n)$ 是功放放大后的输出信号, Gain 是包含了 Predistorter B 和功放的整个链路的增益,功放输出 $y(n)$, 经过定向耦合器和可调衰减器共 $1/\text{Gain}$ 的衰减,再经过 Predistorter A 处理后,输出为 $Z(n)$ 。在理想状态下, Predistorter A 和 Predistorter B 的输出 $z(n)$ 和 $Z(n)$ 相等,此时误差信号 $e(n)$ 为 0, 由于两个预失真器 Predistorter A 和 Predistorter B 相等, 它们的输入 $y(n)/\text{Gain}$ 和 $x(n)$ 也相等,考虑系统的增益 Gain 后, $y(n)$ 对 $x(n)$ 进行了线性放大。

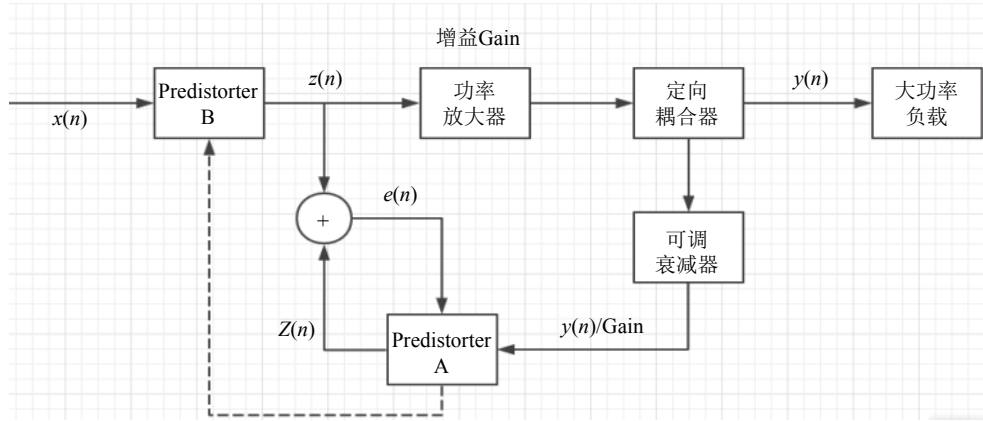


图 1 预失真器的间接学习结构

由于预失真器 A 和 B 完全相同,因此,下面以预失真器 B 为例介绍其输出表达式。预失真器 Predistorter B 的输出信号表达式见式 (1)。其中, $x(n)$ 是系统输入信号, $z(n)$ 是预失真器的输出信号, n 是时间采样序列, q 是采样序列在时间上的延迟值, a_{kq} 是表达式的系数,因此,要求解预失真器 Predistorter B, 就要求出系数 a_{kq} 。

$$z(n) = \sum_{k=1}^K \sum_{q=0}^Q a_{kq} x(n-q) |x(n-q)|^{k-1} \quad (1)$$

为求得系数 a_{kq} , 令:

$$u_{kq}(n) = x(n-q) |x(n-q)|^{k-1} = \frac{y(n-q)}{G} \left| \frac{y(n-q)}{G} \right|^{k-1} \quad (2)$$

将式 (2) 代入式 (1), 可将式 (1) 改写为矩阵形式:

$$z = Ua \quad (3)$$

其中,

$$z = [z(0), z(1), \dots, z(N-1)]^T$$

$$U = [u_{10}, \dots, u_{K0}, \dots, u_{1Q}, \dots, u_{KQ}]$$

$$u_{kq} = [u_{kq}(0), \dots, u_{kq}(N-1)]^T$$

$$a = [a_{10}, \dots, a_{K0}, \dots, a_{1Q}, \dots, a_{KQ}]^T$$

式中, N 是信号点数; K 是非线性阶数; Q 则代表了记忆深度。式 (3) 的最小二乘解为:

$$\hat{a} = (U^H U)^{-1} U^H z \quad (4)$$

求出系数 a 后, 预失真器可按照式 (1) 构建。功放自身的非线性模型也可按照式 (1) 构建, 其非线性特性随环境温度、电路老化漂移等因素影响, 变化较为缓慢, 因此预失真系数 a_{kq} 的求解速度不是关键指标。但是在 a_{kq} 的求解完成后, 为求得 $z(n)$, 式 (1) 的处理需要实时性, 通常采用 FPGA

硬件电路实现。

2 预失真方案

预失真方案如图2所示。图中100 W发射机是行波管体制,行波管由中国电子科技集团公司

第12研究所研制,其工作频率范围为6~18 GHz,输入输出驻波小于2.5,输入信号功率28~30 dBm,在X波段典型输出功率100 W。预失真处理板由FPGA、高速双AD、高速D/A以及一些外围电路组成^[14],详见图3。

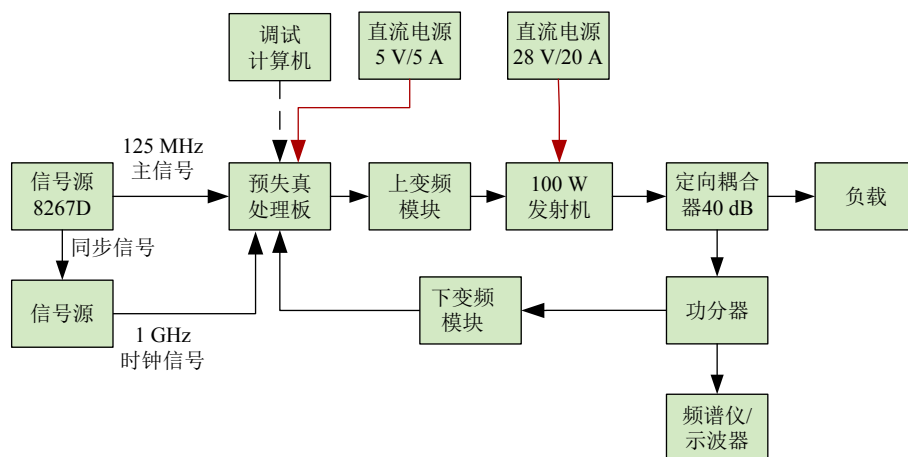


图2 预失真方案框图

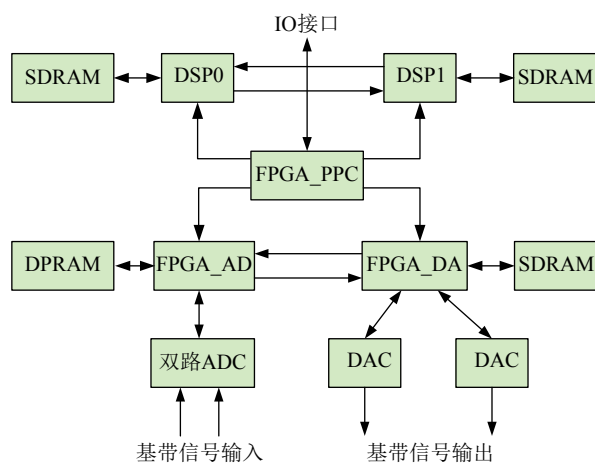


图3 预失真处理板硬件框图

具体实现上,通过信号源E8267D产生中心频率125 MHz的基带信号,输入到预失真处理板,经过预失真处理后,输出到上变频模块,变换为X波段信号,再送入100 W发射机,发射机的输出经过定向耦合器、下变频模块后反馈送入预失真处理板。此外,还需要给预失真处理板外供1 GHz时钟信号。

3 预失真实验

为分析预失真对信号质量的改善效果,在具体微波信号样式上,本文采用了如QPSK、LFM等多

种信号样式,将分别讨论信号质量的改善效果。

3.1 EVM和三阶交调的改善

在通信领域中,QPSK调制是关键技术之一,矢量误差模(error vector magnitude, EVM)是所有影响调制精度的综合指标,且能够最好地以图形化方式反映调制的精度^[15]。

为验证DPD对EVM的改善作用,将主信号设置为带宽10 MHz的QPSK调制信号,上变频器的输出频率设置为8.375 GHz。调整发射机的输入功率,使其处于饱和和工作状态,同时用频谱仪记录无DPD和有DPD时的EVM测试结果,见图4和图5。

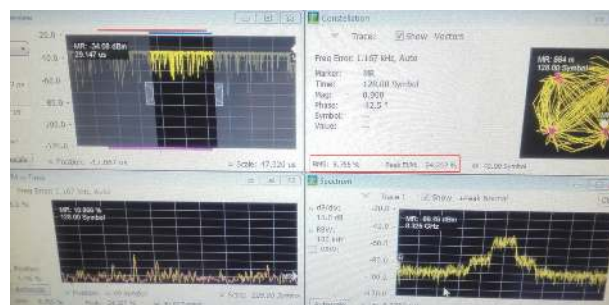


图4 无预失真发射机输出频谱

在加入数字预失真后,对发射机输出交调的抑制约为10 dB,而EVM从8%改善到了5%。

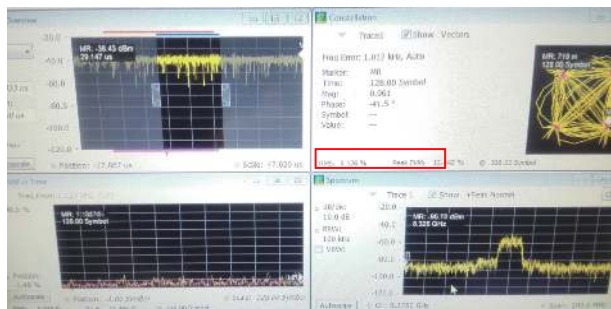


图 5 有预失真发射机输出频谱

3.2 AM-AM、AM-PM 效应的改善

从发射机自身的 AM-AM、AM-PM 效应来进一步对预失真效果进行分析比较, 将发射机的输入、输出信号分别用高速采样示波器采样, 并导入计算机分析, 绘制 AM-AM、AM-PM 曲线, 如图 6 和图 7 所示。该点状图代表了在某一个瞬时输入幅度的条件下, 所对应的不同输出幅度或相位瞬时值。

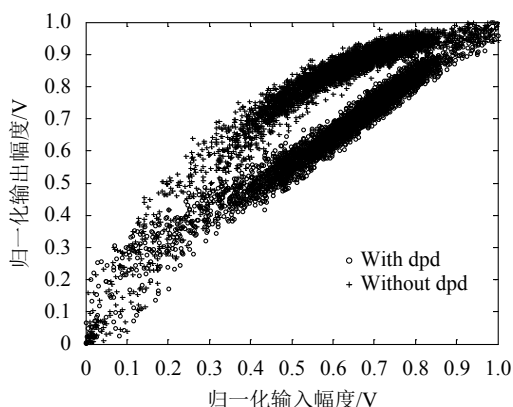


图 6 发射机预失真前后 AM-AM 效应对比

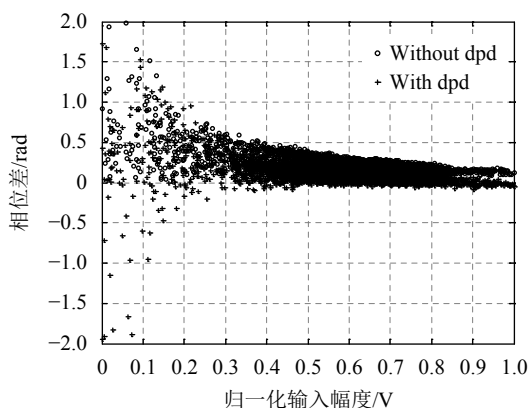


图 7 发射机预失真前后 AM-PM 效应对比

从图 6 可见, 当无预失真时, 随着输入功率的提高, 输出功率逐级趋向饱和, 呈现饱和曲线形状, 而有预失真时, 随着输入功率的提高, 输出功

率基本保持线性变化, 接近理想曲线。

在图 8 中, 纵轴是发射机输出信号相对输入信号的相位差, 从图中可见, 随着输入信号的功率增大, 两条曲线均接近 0, 即相位差变小。但有预失真发射机的输出信号相位差更接近 0, 即其对输入信号相位失真更小。具体数值上, 在接近饱和输出时, 相位差从 0.15 rad 提高到 -0.05 rad。

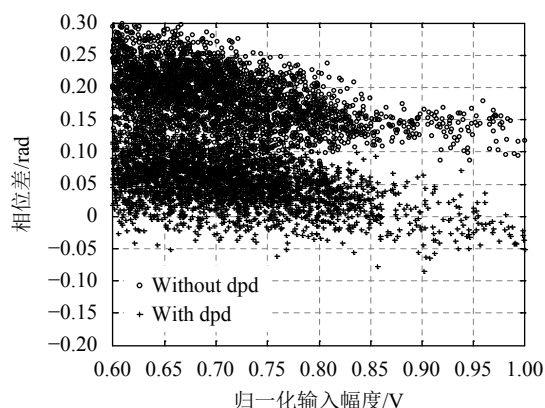


图 8 发射机预失真前后 AM-PM 效应局部放大

3.3 变功率输入时通道间相位一致性的改善

为比较两个发射机在不同输入功率条件下, 有无 DPD 时的相位一致性, 本实验将信号源 E8267D 更换为任意波发生器, 中心频率仍设置为 125 MHz, 3 个带宽为 5 MHz 的 LFM 信号合成输出。详细实验步骤如下:

- 1) 将发射机 A 按照图 2 接入系统, 调整输入功率, 使其处于饱和和工作状态, 用示波器记录发射机输出经过下变频后的信号;
- 2) 将发射机 B 按照图 2 接入系统, 调整输入功率, 使其比步骤 1) 降低 10 dB, 用示波器记录发射机输出经过下变频后的信号;
- 3) 去掉 DPD 板, 让发射机 A 和 B 分别在饱和输出和降低 10 dB 输入功率条件下工作, 用示波器记录发射机输出经过下变频后的信号;
- 4) 将示波器采集到的波形分别进行滤波、FFT 后, 计算发射机 A 和 B 之间的相位差。

实验结果见图 9。可以看到, 由于 DPD 对发射机 AM-PM 效应的改善作用, 在 3 个 LFM 线调信号带内, 有 DPD 时两个不同输入功率发射机之间的相位差较无 DPD 时改善约 10° 。

3.4 时域削峰效应的改善

发射机的非线性在时域上会表现为削峰效应, 且对峰均比高的信号 (如幅度调制信号等) 更为明显。

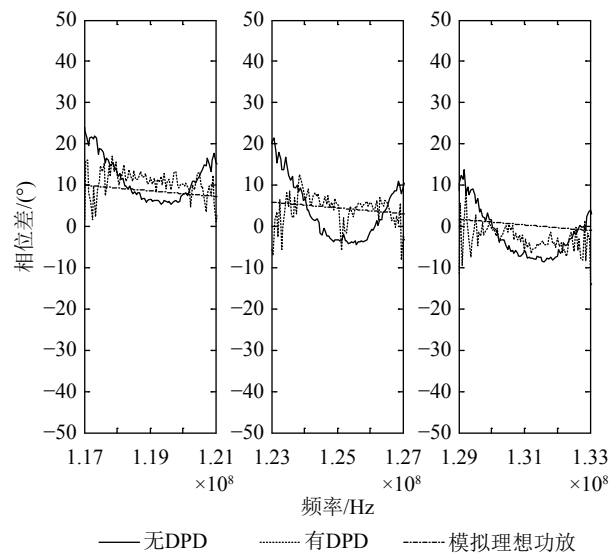


图9 发射机预失真前后两通道相位一致性比较

本实验中主信号的设置同3.3节,其在时域上表现为一个包络幅度调制信号,经过无DPD和有DPD两种发射机后,采用高速示波器记录输出信号。为对比无DPD和有DPD对时域削峰效应的差异,用时域峰值-3 dB的宽度来进行比较,如表1所示。

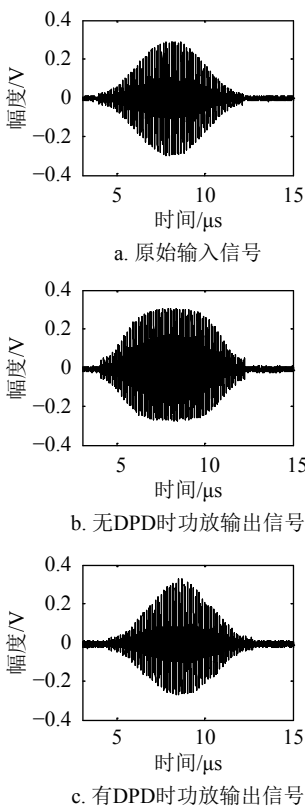


图10 发射机预失真前后时域波形对比

表1 时域峰值-3 dB 宽度对比

采样率/ Sa·s ⁻¹	输入信号-3 dB 宽度(采样点数)	无DPD时输出信号 -3 dB宽度(采样点数)	有DPD时输出信号 -3 dB宽度(采样点数)	输入信号 -3 dB宽度/μs	无DPD时输出信号 -3 dB宽度/μs	有DPD时输出信号 -3 dB宽度/μs
3.13×10 ⁹	8850	14075	9910	2.83	4.50	3.17

从图10和表1可见,无DPD时功放饱和输出有较为明显的削峰现象,时域峰值-3 dB宽度从输入信号的2.83 μs变到了4.50 μs;而有DPD时功放饱和输出的削峰现象得到了改善,时域峰值-3 dB宽度从输入信号的2.83 μs变到了3.17 μs,改善了1.33 μs。

4 结束语

从频域上来看,数字预失真对交调有抑制作用,从而带来邻道干扰的改善。从时域上来看,数字预失真对波形有保真作用,即改善了调幅信号在经过功放饱和输出后的削峰、限幅现象。从本质上来看,数字预失真对发射信号的幅度和相位失真具有校正作用,随着对发射机输出信号质量要求的提高,如要求幅相一致性更高、非线性产物更少,具有预校正功能的发射机预计会得到广泛的应用。

参 考 文 献

[1] JOEL L D, THOMAS H L. Feedback Linearization of RF power amplifiers[M]. New York: Kluwer Academic Publisher, 2004.

[2] 毛云祥,张正言,雷磊,等.基于IPLS的记忆功放数字预失真技术[J].电子信息对抗技术,2015,30(2): 30-34. MAO Y X, ZHANG Z Y, LEI L, et al. Digital predistortion technique for power amplifier with memory effects based on IPLS algorithm[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2015, 30(2): 30-34.

[3] 高建蓉.影响RRH系统性能因素的探讨与研究[J].电子信息对抗技术,2012,27(6): 78-84. GAO J R. Discussion and research about the elements of RRH system performance[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2012, 27(6): 78-84.

[4] 冯保良,高建蓉,李在清.宽带Doherty功率放大器的理论和设计[J].电子信息对抗技术,2016,31(2): 66-82. FENG B L, GAO J R, LI Z Q. The theory and design of broadband Doherty RF power amplifier[J]. Electronic Information Warfare Technology, 2016, 31(2): 66-82.

[5] 曹韬,刘友江,杨春,等.高效宽带包络跟踪系统电路性能

- 优化及非线性行为校正[J]. *电子与信息学报*, 2020, 42(3): 787-794.
- CAO T, LIU Y J, YANG C, et al. Circuits optimization and system linearization for high efficiency and wideband envelope tracking architecture[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(3): 787-794.
- [6] 陈雷, 岳光荣, 唐俊林, 等. 基于数字预失真的发射机 I/Q 不平衡校正[J]. *电子与信息学报*, 2017, 39(4): 847-853.
- CHEN L, YUE G R, TANG J L, et al. Calibration of transmitter I/Q imbalance based on digital pre-distortion[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2017, 39(4): 847-853.
- [7] 杨光, 李晓东, 胡啸, 等. 宽带 Chirp 信号激励下功放数字预失真补偿[J]. *微波学报*, 2018, 34(5): 49-53.
- YANG G, LI X D, HU X, et al. Digital predistortion for power amplifiers with wideband chirp signal excitation[J]. *Journal of Microwaves*, 2018, 34(5): 49-53.
- [8] 张黎, 刘太君, 谢晋雄, 等. 基于 SoC 的可重构短波功放数字预失真线性化[J]. *微波学报*, 2019, 35(3): 85-89.
- ZHANG L, LIU T J, XIE J X, et al. SoC based reconfigurable digital pre-distortion linearization for short-wave power amplifiers[J]. *Journal of Microwaves*, 2019, 35(3): 85-89.
- [9] 刘宁. 功放数字基带预失真算法研究及硬件实现[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- LIU L. Research and hardware implementation of digital baseband predistortion algorithm for power amplifier[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011.
- [10] LEI D, ZHOU G T, MORGAN D R, et al. A robust digital baseband predistorter constructed using memory polynomials[J]. *IEEE Transactions On Communications*, 2004, 52(1): 159-165.
- [11] 尹思源, 刘太君, 叶焱, 等. 广义记忆型神经网络射频功放数字预失真器[J]. *微波学报*, 2018, 34(2): 47-50.
- YIN S Y, LIU T J, YE Y, et al. Digital predistorters based on generalized memory neural networks for RF power amplifiers[J]. *Journal of Microwaves*, 2018, 34(2): 47-50.
- [12] 张月, 黄永辉. 一种基于直接学习结构的数字预失真方法[J]. *电子设计工程*, 2018, 26(11): 97-100.
- ZHANG Y, HUANG Y H. A digital predistortion method using the direct learning architecture[J]. *Electronic Design Engineering*, 2018, 26(11): 97-100.
- [13] 李世伟, 韩军, 杨作成. 基于数字预失真技术的功放线性化方法研究[J]. *电子测量技术*, 2020, 43(1): 132-136.
- LI S W, HAN J, YANG Z C. Study on linearization method for power amplifier based on digital predistortion technology[J]. *Electronic Measurement Technology*, 2020, 43(1): 132-136.
- [14] 杨瑜, 徐立. 一种 VHF 频段放大器的数字预失真设计与实现[J]. *电子信息对抗技术*, 2018, 33(1): 73-82.
- YANG Y, XU L. Design and implementation of digital predistortion in VHF band amplifier[J]. *Electronic Information Warfare Technology*, 2018, 33(1): 73-82.
- [15] 张济民. EDGE-8PSK 的精确 EVM 测量算法[J]. *国外电子测量技术*, 2014, 33(8): 26-33.
- ZHANG J M. Algorithm for accurate EVM measurement of EDGE-8PSK[J]. *Foreign Electronic Measurement Technology*, 2014, 33(8): 26-33.

编辑 叶芳