

基于Landweber迭代算法的欠采样恢复数字预失真技术

蔡天赋^① 李明玉^{*①} 靳一^② 徐常志^②

^①(重庆大学微电子与通信工程学院 重庆 400044)

^②(中国空间技术研究院西安分院 西安 710100)

摘要: 传统宽带数字预失真(DPD)为了更好地矫正功率放大器(PA)非线性特性, 通常要求反馈通道带宽达到发送信号带宽的5倍, 相应地要求更高采样率的模数转换器(ADC), 这将导致数字预失真系统面临着硬件成本和能耗问题。针对这一问题, 该文提出一种基于Landweber迭代算法的欠采样恢复(USR)数字预失真(Landweber-USR DPD)技术。这种以内外循环的方式进行处理, 可将反馈通道带宽从理论要求的5倍降低至2倍, 以良好的质量从欠采样的功放输出信号中恢复全频带的输出信号, 使还原出的数据更接近真实的功放输出信号, 以实现更好的预失真效果。实验选用基于单管氮化镓(GaN)器件的宽带F类功率放大器, 在1.8 GHz工作频点下用5 MHz的长期演进(LTE)信号激励, 反馈ADC速率分别设置为全采样速率(40 Msps)和欠采样速率(10 Msps)。实验结果充分证明了Landweber迭代算法恢复功放数据的可靠性以及Landweber-USR DPD技术的有效性, 为宽带通信系统中数字预失真技术的工程实现提供了有效降低ADC采样率的思路和方法。

关键词: 数字预失真; 欠采样; 内外循环; Landweber迭代

中图分类号: TN911.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-5896(2021)11-3166-08

DOI: 10.11999/JEIT201051

An under-Sampling Restoration Digital Predistortion Technique Based on Landweber Iteration Algorithm

CAI Tianfu^① LI Mingyu^① JIN Yi^② XU Changzhi^②

^①(School of Microelectronics and Communication Engineering,
Chongqing University, Chongqing 400044, China)

^②(China Academy of Space Technology-Xi'an, Xi'an 710100, China)

Abstract: In order to better correct the nonlinear characteristics of Power Amplifier (PA), conventional broadband Digital PreDistortion (DPD) requires usually the feedback channel bandwidth to be 5 times of the transmitting signal bandwidth, and Analog to Digital Converter (ADC) with higher sampling rate is required accordingly, which will lead to the hardware cost and energy consumption problems of digital predistortion system. To solve this problem, an Landweber iterative algorithm-based UnderSampled Restoration (USR) Digital PreDistortion method (Landweber-USR DPD) is proposed. It is processed in an internal and external loop, which can recover the full-band output signals from the undersampled PA output signals under the requirements that the sampling rate requirement of ADC is reduced from 5 times to twice. And the restored data is closer to the real PA output signals to achieve better pre-distortion effect. In experiment, a single-device Gallium Nitride (GaN) broadband class-F PA is excited by 5 MHz-LTE signal in 1.8 GHz frequency. The feedback ADC rate is set as full sampling rate (40 Msps) and undersampling rate (10 Msps), respectively. The experimental results fully demonstrate the reliability of Landweber iterative algorithm and the effectiveness of Landweber-USR DPD technology, which can provide an idea and method for effectively reducing ADC sampling rate in the engineering implementation of digital predistortion technology in broadband communication systems.

Key words: Digital PreDistortion (DPD); Under-sampling; Internal and external loop; Landweber iteration

收稿日期: 2020-12-14; 改回日期: 2021-07-01; 网络出版: 2021-07-07

*通信作者: 李明玉 myli@cqu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金(61801377, 62001375), 国家重点研发计划(2019YFB1803102)

Foundation Items: The National Natural Science Foundation of China (61801377, 62001375), The National Key Research and Development Program (2019YFB1803102)

1 引言

随着第五代移动通信系统对更高的数据传输速率发出挑战, 高频谱效率、低延迟、大容量的无线通信系统成为各大运营商的战略目标。提高网络容量的有效方法是使用更大的调制带宽, 目前, 移动通信已经在低于6 GHz频率的宽带调制下运行, 对于先进的长期演进技术(LTE-A), 其信号带宽已经达到100 MHz^[1-3]。随着5G技术的发展, 更大调制带宽的增强型移动宽带(enhanced Mobile Broad-Band, eMBB)将成为毫米波通信技术的基础, 因此必须考虑此频段下通信所面临的传输链路的挑战^[4]。其中, 对于射频前端最重要的非线性器件——功率放大器, 在宽带信号激励下并伴随其深度记忆效应, 更容易激发严重的非线性失真, 对高线性化发射机的设计造成一定困难, 为此, 国内外研究者花费了大量时间来研究这种失真的补偿技术。

基带数字预失真(Digital PreDistortion, DPD)技术允许功率放大器在更高的驱动水平下高效工作并且不丢失线性, 展现出不朽的竞争力而被广泛使用^[5]。然而, 面对宽带信号传输, 在系统可用采样率以及处理带宽有限的情况下, 数字预失真的效果也受到了限制^[6-9]。通常, 对于功率放大器的输出信号, 交调产物的存在致使邻通道频谱再生, 以调制信号为例, 5阶非线性产物出现在5倍输入带宽内, 为保障非线性的建模效果, 反馈通道的捕获带宽需要达到原始输入带宽的5倍, 这对采样模数转换器(Analog to Digital Converter, ADC)提出了极高的要求, 也对整个发射机与接收机链路的设计造成困难, 使得数字预失真在多数情况下变得不可行。此外, 随着5G系统对宽带信号越来越高的要求, DPD中高速处理模块会大大增加系统功耗, 让设计师们不得不考虑降低速率实现DPD, 却带来混叠失真等诸多问题^[10,11]。许多学者为解决此问题作了大量的研究, 文献^[12]验证了奈奎斯特速率下足以对无记忆非线性系统建模, 通过对预失真系数的插值实现无混叠预失真信号的输出; 文献^[13]利用在系统的有限冲激响应(Finite Impulse Response, FIR)滤波器中插入延迟单元实现零点的填充, 减少插值带来的系统消耗。文献^[14]在现有模型中加入交叉项, 来补偿低采样率下的混叠失真。文献^[15]提出了带限函数约束下的带限预失真模型, 权衡系统成本可自定义线性化带宽大小。更进一步地, 文献^[16]利用对带限反馈信号的频谱外推技术, 实现低速ADC下的宽带预失真系统, 文献^[17]在此基础上引入Levenberg-Marquardt算法, 使外推技术的稳定性有所提高。近年来, 学术界提

出的欠采样还原(Under Sampling Restoration, USR)技术, 可在去除带限滤波器的情况下, 利用迭代技术可对欠采样信号实现全频带功放输出的恢复^[18]。针对超宽带功率放大器的线性化问题, 文献^[19]将前导项与交叉项的线性分解相结合, 降低采样率不足下的频谱混叠情况, 并在毫米波段进行了验证。针对欠采样率下的混叠失真问题, 文献^[20]采用多段分段抵消方案消除混叠失真。

上述方法虽然都能在欠采样条件下实现数字预失真, 但是这些方法本身也存在不少约束。例如基于频谱外推的数字预失真中, 需要在反馈通道加入带限滤波器, 在实际情况下, 带限滤波器的性能和设计本身可能存在问题; 在文献^[18]提出的基于USR的数字预失真中, 预失真系统结构复杂, 虽然降低了ADC采样率却需要增加一个额外的数模转换器(Digital to Analog Converter, DAC)。因此, 本文提出一种利用Landweber迭代法恢复欠采样数据从而实现宽带预失真矫正的可行技术。本方法在数据恢复阶段引入Landweber迭代算法^[21], 利用USR迭代中所求出的复增益进行功放欠采样数据的还原, 经过详细的理论分析和严格的实验验证, 基于Landweber迭代的USR(Landweber-USR)算法有着比文献^[18]更好的预失真效果。在此新系统中, DPD所需求的反馈通道带宽被大大降低, 实验验证了从大于5倍带宽到只需2倍带宽的采样率需求, 相应地, 低成本的捕获通道为超宽带传输中数字预失真的实现提供了可能。

本文组织如下, 第2节介绍Landweber-USR技术的基础理论, 包括复增益的定义和功放数据的还原所需的Landweber迭代形式, 第3节介绍Landweber-USR预失真系统详细的迭代过程, 并以流程图的形式清晰地展现欠采样预失真技术的工作过程, 第4节给出实验结果以及与USR技术的比较, 第5节做简明的结论。

2 Landweber-USR迭代算法

本文所提Landweber-USR数据恢复技术包含内外两步循环, 外循环为利用USR技术获得欠采样系统复增益的有效估计, 内循环为利用所求的复增益的有效估计, 运用Landweber迭代法还原功放真实输出数据。

2.1 USR基本定理

定义数字预失真系统中DAC的转换速率和ADC的采样速率分别为 F_{s-DAC} 和 F_{s-ADC} , 其中ADC作为反馈通道的欠采样器件, 有 $F_{s-ADC} < F_{s-DAC}$ 。功率放大器的输出信号 $y_a(t)$ 经过衰减器, 下变频后进行欠采样, 其采样数据记为 $\hat{y}_r(n)$, 在数字域中,

为了匹配反馈通道与发射通道的数据速率, 对 $\hat{y}_f(n)$ 进行重采样处理, 将数据速率由 F_{s-ADC} 提高至 F_{s-DAC} 得到 $y_f(n)d$, 针对 $x(n)d$ 与 $y_f(n)$ 作时间对齐, 详细反馈通道结构如图1所示。

定义信号 $y_a(n)$ 为功放输出 $y_a(t)$ 经反馈通道后以 F_{s-DAC} 为采样率得到的基带信号, 则可表示反馈通道的传递函数 $F(\cdot)$ 和复增益 $G(\cdot)$

$$y_f(n) = F(y_a(n)) = G(n) \cdot y_a(n) \quad (1)$$

反馈通道存在混叠现象和非理想响应, $G(\cdot)$ 可近似表示为

$$G(n) = \frac{y_f(n)}{y_a(n)} \quad (2)$$

其中, $G(n)$ 由每个采样数据定义, 用来表示输入输出序列之间的关系。 $y_f(n)$ 是数字预失真系统以欠采样率得到的数据, $y_a(n)$ 是所期望得到的功放真实输出信号。在欠采样条件下, $y_a(n)$ 无法直接获取, 但如果获得 $G(n)$ 的有效估计 $G_{fR}(n)$, 可得到 $y_a(n)$ 的有效估计 $y_{aR}(n)$

$$y_{aR}(n) = \frac{y_f(n)}{G_{fR}(n)} \quad (3)$$

因此恢复 $y_{aR}(n)$ 可以通过估计反馈通道的复增益 $G(\cdot)$ 间接求得, 恢复出的功放信号 $y_{aR}(n)$ 是真实功放输出信号的估计值, 此估计值可用于建立功率放大器正向模型和预失真参数提取。

2.2 基于Landweber迭代法的数据恢复过程

Landweber迭代法是反演问题中常用的一种计算方法。线性反问题在计算上可以简单理解为求解非齐次线性系统

$$Ax = b \quad (4)$$

其中, $A \in R^{m \times n}$, $x \in R^n$, $b \in R^m$, A 是非0的 $m \times n$ 矩阵。在 $m = n$ 的情况下, 求解上述问题分为直接法和迭代法, Landweber迭代法就属于后者, 其迭代形式为

$$x^k = x^{k-1} + \omega A^T(b - Ax^{k-1}) \quad (5)$$

其中, x^k 表示第 k 次迭代后的数据, k 表示迭代次数, ω 为步长, 且满足 $0 < \omega \leq 1/\|A\|^2$ 。通常, 取

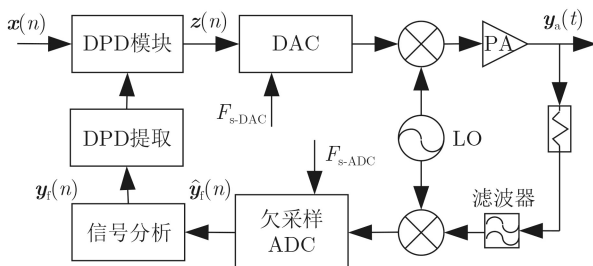


图1 USR反馈通道结构

初始值 $x^0 = 0$, 该迭代将会收敛于最小二乘解。利用Landweber迭代还原法^[21], 可在内循环中恢复每次外循环(USR迭代)过程中所需要的功放迭代数据, 详细如下: USR最重要的思想是通过表征反馈通道的传递函数、复增益, 间接实现对复增益的估计和信号的还原, 有

$$y_f(n) = F(y_a(n)) \quad (6)$$

$$G(n) = \frac{y_f(n)}{y_a(n)} \quad (7)$$

其中, $F(\cdot)$ 表示功放的输出信号与预失真系统采集到的数据之间的映射关系。在Landweber迭代算法中有映射关系 $F: X \rightarrow b$, 根据Landweber推荐的迭代格式(5), 迭代需要已知的观测矩阵和系统测量值。因此可以把反馈通道的复增益看成系统观测矩阵的近似, 欠采样数据看作系统的测量值。可以得到

$$b = y_f(n) \quad (8)$$

$$A = \text{diag}(G(n)) \quad (9)$$

其中, 观测矩阵 A 是由 $G(n)$ 构成的对角阵, 则基于Landweber迭代还原算法的功放输出信号迭代式可表示为

$$y_{aR}^k = y_{aR}^{k-1} + A^T(y_f(n) - Ay_{aR}^{k-1}) \quad (10)$$

3 基于Landweber-USR迭代的数字预失真系统

基于Landweber-USR迭代技术的欠采样数字预失真矫正系统分为迭代还原功放数据和提取预失真器参数两个过程, 详细结构如图2所示。

USR迭代还原功放数据的第1步就是表征 $G_{fR}(n)$ 。具体的做法是通过反馈通道采集功放的输入信号 $x(n)$, 该过程相当于功率放大器被旁路, 信号记为 $x(n)$, 则可以初步得到反馈通道的复增益 $G(\cdot)$ 估计值

$$G_{fR}(n) = \frac{x_f(n)}{x(n)} \quad (11)$$

式(11)也可表征第1次外循环所求得的复增益, 之后进入内循环。利用Landweber迭代还原第1次功放输出

$$y_{aR}^{(1)k}(n) = y_{aR}^{(1)k-1}(n) + A^{(1)T}(y_f(n) - A^{(1)}y_{aR}^{(1)k-1}(n)) \quad (12)$$

$$A^{(1)} = \text{diag}(G_{fR}(n)) = \text{diag}\left(\frac{x_f(n)}{x(n)}\right) \quad (13)$$

由于 $x(n)$ 不等同于实际的功放输出 $y_a(n)$, 此时初步还原的数据 $y_{aR}^{(1)}(n)$ 并不足够趋近 $y_a(n)$, 测量反

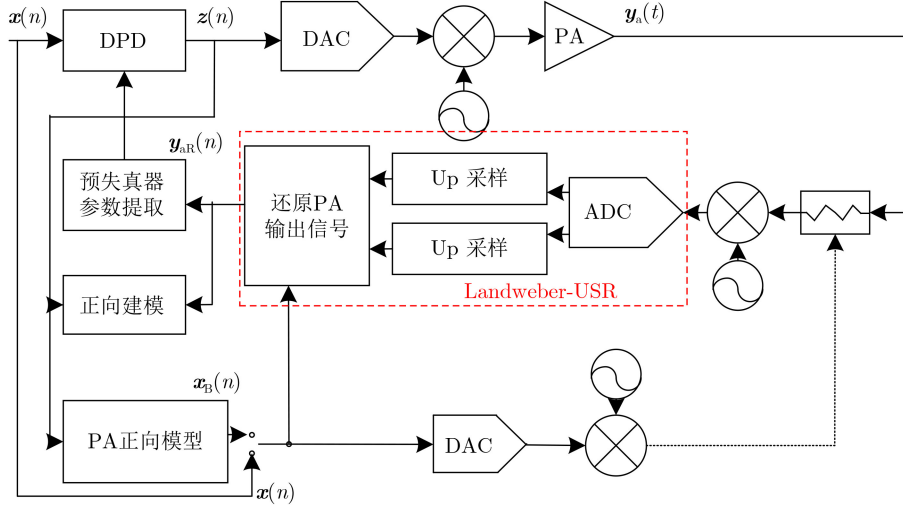


图 2 Landweber-USR预失真系统框图

馈通道的复增益估计值不够准确。因此需USR通过迭代逼近反馈通道的真实复增益，USR外循环中的第2步是利用初步还原数据 $y_{aR}^{(1)}(n)$ 和输入信号 $x(n)$ 建立功放正向模型

$$\mathbf{X}_{(1)} \cdot \mathbf{B}^{(1)} = \mathbf{Y}_R^{(1)} \quad (14)$$

其中， \mathbf{X} 是由模型输入构造的矩阵， \mathbf{B} 是模型系数向量， \mathbf{Y}_R 是模型输出向量。利用记忆多项式模型建模

$$y_R(n) = \sum_k^K \sum_m^{M-1} b_{km}^{(1)} x(n-m) |x(n-m)|^{m-1} \quad (15)$$

取模型训练输入输出信号长度为 L ，设 K 为模型非线性阶数， M 为记忆深度，有

$$\mathbf{X}_{(1)} = \begin{bmatrix} \mathbf{X}_{(1)}(n) \\ \mathbf{X}_{(1)}(n-1) \\ \vdots \\ \mathbf{X}_{(1)}(n-L+1) \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$\mathbf{B}^{(1)} = [b_{00}^{(1)}, \dots, b_{K0}^{(1)}, b_{01}^{(1)}, \dots, b_{KM}^{(1)}]^T \quad (17)$$

$$\mathbf{Y}_R^{(1)} = [y_{aR}^{(1)}(n), y_{aR}^{(1)}(n-1), \dots, y_{aR}^{(1)}(n-L+1)]^T \quad (18)$$

使用最小二乘法提取模型系数 \mathbf{B}

$$\mathbf{B}^{(1)} = (\mathbf{X}_{(1)}^H \cdot \mathbf{X}_{(1)})^{-1} \cdot \mathbf{X}_{(1)}^H \cdot \mathbf{Y}_R^{(1)} \quad (19)$$

利用此模型系数，更新辅助通道输入数据 $x_B^{(2)}(n)$

$$x_B^{(2)}(n) = \sum_k^K \sum_m^{M-1} b_{km}^{(1)} x(n-m) |x(n-m)|^{m-1} \quad (20)$$

其中， $x_B^{(2)}(n)$ 是功放正向模型的输出， $x_B^{(2)}(n)$ 比 $x(n)$ 更接近功放的实际输出信号，当反馈通道输入为 $x_B^{(2)}(n)$ 时，得到输出信号 $x_B^{(2)}(n)$ ，此时更新第2次外循环反馈通道的复增益估计

$$\mathbf{G}_{fR}^{(2)}(n) = \frac{x_B^{(2)}(n)}{x_B^{(2)}(n)} \quad (21)$$

然后进入内循环更新功放输出信号的估计值

$$y_{aR}^{(2)k}(n) = y_{aR}^{(2)k-1}(n) + \mathbf{A}^{(2)T}(y_f(n) - \mathbf{A}^{(2)} y_{aR}^{(2)k-1}(n)) \quad (22)$$

$$\mathbf{A}^{(2)} = \text{diag}(\mathbf{G}_{fR}^{(2)}(n)) = \text{diag} \left(\frac{x_B^{(2)}(n)}{x_B^{(2)}(n)} \right) \quad (23)$$

最后，更新功放正向模型。

将以上过程梳理，Landweber-USR迭代过程可分为欠采样复增益计算、Landweber迭代数据还原、更新功放正向模型3个基本步骤，Landweber-USR的迭代就是对上述步骤的重复。第 $j(j > 1)$ 次还原数据为

$$y_{aR}^{(j)k}(n) = y_{aR}^{(j)k-1}(n) + \mathbf{A}^{(j)T}(y_f(n) - \mathbf{A}^{(j)} y_{aR}^{(j)k-1}(n)) \quad (24)$$

$$\mathbf{A}^{(j)} = \text{diag}(\mathbf{G}_{fR}^{(j)}(n)) = \text{diag} \left(\frac{x_B^{(j)}(n)}{x_B^{(j)}(n)} \right) \quad (25)$$

$$x_B^{(j)}(n) = \sum_k^K \sum_m^{M-1} b_{km}^{(j-1)} x(n-m) |x(n-m)|^{m-1} \quad (26)$$

至此，整个Landweber-USR迭代下的预失真矫正系统的算法流程可如图3所示，其中， J, K 分别代表外循环与内循环的循环次数，显而易见的是，在任意第 j 次的外循环迭代中，都将进行 K 次的内循环Landweber算法迭代。与文献[18]所提USR方法进行对比，可从计算复杂度与数据还原效果来对比两种方法的效果：USR在 $2n$ 复数运算后还原1次数据，Landweber迭代需 $3nK$ 次复数运算，在数据还原效果上Landweber-USR算法优于USR迭代算法，在后续实验中给出结果。

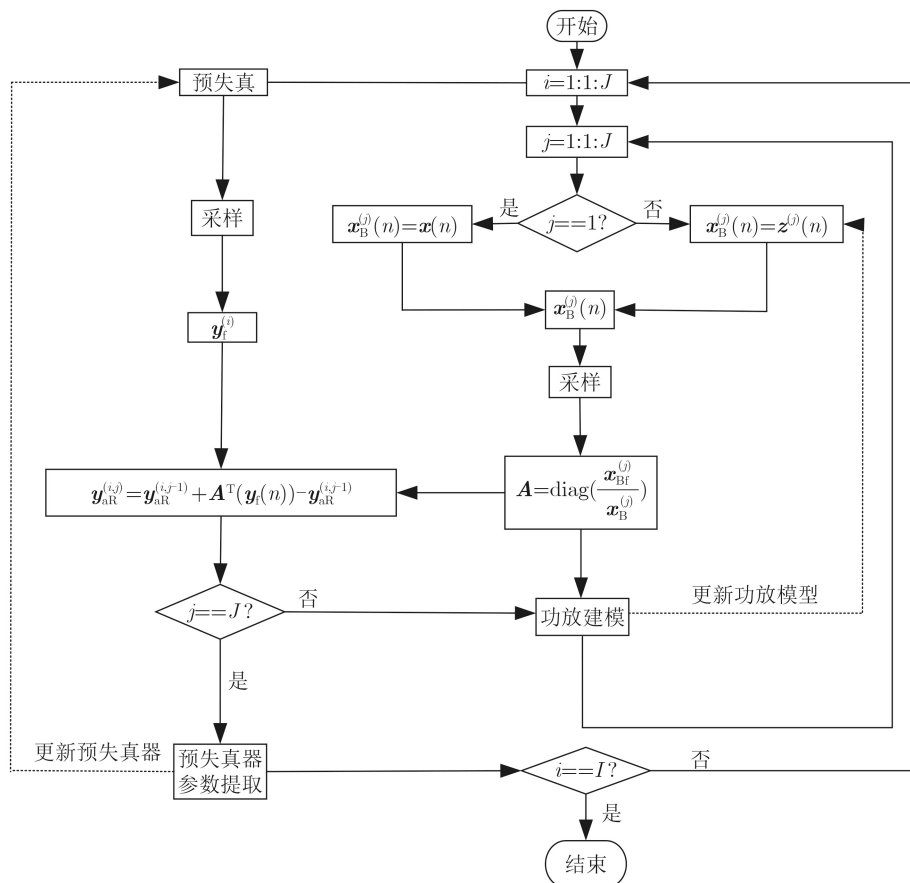


图3 Landweber-USR算法流程

4 仿真实验及结果

为了评估Landweber-USR DPD技术的性能,使用基于测量仪器的数字预失真验证平台,包含传输路径、反馈路径、被测设备和计算机(PC)。矢量信号发生器(Vector Signal Generator, VSG)的输出端经驱动放大器后连接被测设备(功率放大器)的输入端构成传输路径,功放的输出端经过衰减器连接至频谱分析仪(Vector Spectrum Analyzer, VSA)构成反馈路径,矢量信号发生器和频谱分析仪经由LAN接口连接至PC, PC运行MATLAB生成基带数据给矢量信号发生器,并记录从反馈路径采回的信号。所有的信号处理工作,包含Landweber-USR迭代和预失真参数提取,均在设备级联下的MATLAB中完成,图4给出了实验平台的现场图。

受仪器测量带宽限制,实验使用带宽为5 MHz的LTE信号作为测试信号,矢量信号发生器使用罗德斯瓦兹(ROHDE&SCHWARZ, RS)公司推出的SMBV100A,发射频段可达3.2 GHz,基带信号转化率(DAC频率)最高80 MHz,设置DA转化率为40 MHz(远大于5倍基带带宽),频谱分析仪使用RS公司的FSV13,支持最高ADC采样率45 Msps,设



图4 实验平台现场图

置全采样速率40 Msps与欠采样速率10 MHz。功率放大器使用一款工作频点为1.8 GHz宽带F类功率放大器,输出平均功率为35 dBm,增益为17.1 dB。测试步骤如下:

- (1) 以40 Msps的采样率采集功率放大器的输出信号用于误差计算并作为实验对照组;
- (2) 以10 Msps的采样率采集功率放大器的输出信号;
- (3) 使用USR迭代还原功放输出信号;

(4) 使用Landweber-USR迭代法还原功放输出信号；

(5) 对比USR迭代同Landweber-USR迭代后DPD效果。

图5(a)和图5(b)分别给出了使用USR算法和Landweber-USR迭代法还原功放输出信号的功率谱变化过程。在具体迭代过程中，使用功放正向模型为MP模型(非线性阶数 $K=7$ ，记忆深度 $M=5$)，USR算法的迭代次数为6，Landweber-USR算法的外循环迭代次数为6，内循环迭代次数为50。经过1次USR和Landweber-USR迭代处理后，功放信号还原效果明显，随着迭代次数的增加，还原的精度逐步增加。图6给出了使用两种迭代方法恢复出的信号与实际功放信号的归一化均方根误差图(Normalized Root Mean Square Error, NRMSE)，得到两类算法还原效果与迭代次数的关系，NRMSE随着迭代次数增加而显著减小，并且可以看到，在相同的迭代次数下，Landweber-USR迭代算法的信号还原效果要优于USR迭代算法。

接着，通过仪器平台进行了USR与Landweber-USR迭代还原下的数字预失真实验，两类算法所还

原的功放数据同输入信号进行后逆模型建模，提取系数，此预失真模型依旧选用MP模型($K=7$ ， $M=3$)，将经预失真器后的预失真信号用矢量信号发生器输出至F类功率放大器，在频谱仪观测输出信号频谱，并通过PC记录频谱数据。功放输入输出信号频谱，USR DPD和Landweber-USR DPD线性化处理后的频谱如图7所示。

USR DPD同Landweber-USR DPD均在较低的ADC采样率下，表现出较好的DPD性能。通过测量系统的原始信号频谱所揭示的系统底噪情况，可以看出经过两类算法迭代后的线性化输出正在靠近此底噪，且Landweber-USR算法情况稍好于USR迭代，这主要取决于Landweber-USR算法还原的功放数据好于单纯复增益比值下还原的信号。进一步讨论ACPR线性化结果情况：未经预失真矫正的功放输出信号，其ACPR为 -29 dB，USR DPD线性化后功放输出信号ACPR为 -47.23 dB，而Landweber-USR DPD矫正后的功放输出信号ACPR为 -48.92 dB，其线性化结果好于USR算法。将本文提出的Landweber-USR算法，与文献[18]提出的USR算法的实验结果相比较，并将两种算法的优缺点

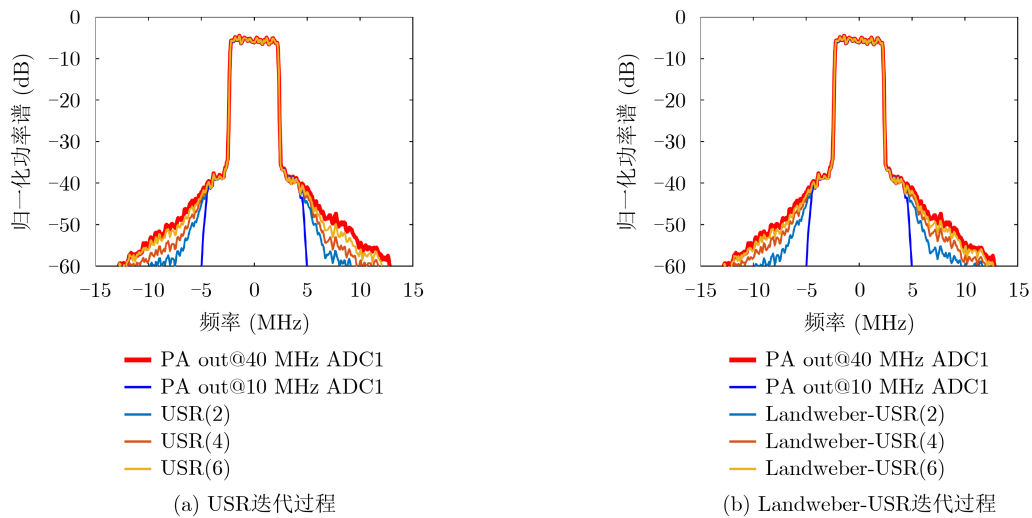


图 5 USR和Landweber-USR迭代变化情况

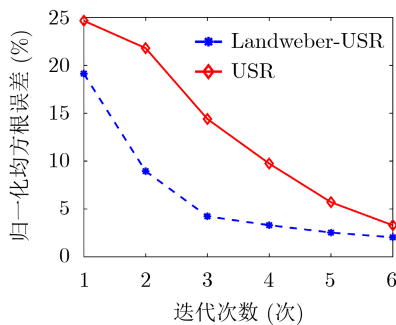


图 6 归一化均方根误差对比

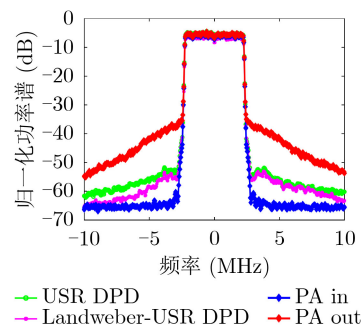


图 7 预失真输出对比

点总结于表1。从表1可以得出, Landweber-USR算法在增加迭代次数的情况下, 功放输出数据的还

原效果加强, 这更有利于后续的预失真实验, 进一步提升了算法的线性化能力。

表1 USR和Landweber-USR实验结果优缺点比较

算法名称	迭代次数	还原效果NRMSE(%)	线性化效果ACPR(dB)
USR	6	3.29	-47.23
Landweber-USR	外循环6 内循环50	2.04	-48.92

5 结束语

本文提出一种欠采样数字预失真矫正技术, 本方法首先使用内外循环过程还原欠采样功放输出数据, 其中, 外循环为利用欠采样数据的更迭求得反馈通道的欠采样复增益, 内循环为利用外循环所求复增益, 在Landweber迭代法下恢复功放输出数据。随后, 将还原的功放输出与原始输入做后逆模型估计, 提取预失真器参数。实验测试验证该方法仅以2倍信号带宽的反馈通道采样速率便实现满意的线性化指标, ADC速率需求显著降低, 使其成为未来超宽带预失真系统的可行解决方案。

参考文献

- [1] ONOE S. 1.3 Evolution of 5G mobile technology toward 1 2020 and beyond[C]. 2016 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC), San Francisco, USA, 2016: 23-28. doi: [10.1109/ISSCC.2016.7417891](https://doi.org/10.1109/ISSCC.2016.7417891).
- [2] SHAFI M, MOLISCH A F, SMITH P J, *et al.* 5G: A tutorial overview of standards, trials, challenges, deployment, and practice[J]. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2017, 35(6): 1201-1221. doi: [10.1109/JSAC.2017.2692307](https://doi.org/10.1109/JSAC.2017.2692307).
- [3] NEININGER P, FRIESICKE C, KRAUSE S, *et al.* A sequential power amplifier at 3.5 GHz for 5G applications[C]. 2017 47th European Microwave Conference (EuMC), Nuremberg, Germany, 2017: 284-287. doi: [10.23919/EuMC.2017.8230855](https://doi.org/10.23919/EuMC.2017.8230855).
- [4] RANGAN S, RAPPAPORT T S, and ERKIP E. Millimeter-wave cellular wireless networks: Potentials and challenges[J]. *Proceedings of the IEEE*, 2014, 102(3): 366-385. doi: [10.1109/JPROC.2014.2299397](https://doi.org/10.1109/JPROC.2014.2299397).
- [5] KIM J and KONSTANTINOU K. Digital predistortion of wideband signals based on power amplifier model with memory[J]. *Electronics Letters*, 2001, 37(23): 1417-1418. doi: [10.1049/el:20010940](https://doi.org/10.1049/el:20010940).
- [6] WOOD J. System-level design considerations for digital predistortion of wireless base station transmitters[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2017, 65(5): 1880-1890. doi: [10.1109/TMTT.2017.2659738](https://doi.org/10.1109/TMTT.2017.2659738).
- [7] GILBERT P L, VEGAS D, REN Zhixiong, *et al.* Design and digital predistortion linearization of a wideband outphasing amplifier supporting 200 MHz bandwidth[C]. 2020 IEEE Topical Conference on RF/Microwave Power Amplifiers for Radio and Wireless Applications (PAWR), San Antonio, USA, 2020: 46-49. doi: [10.1109/PAWR46754.2020.9035997](https://doi.org/10.1109/PAWR46754.2020.9035997).
- [8] SHI Bo. Digital Predistortion linearization of wideband transmitter for high data rate satellite communications[C]. 2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), Singapore, 2019: 1589-1591. doi: [10.1109/APMC46564.2019.9038220](https://doi.org/10.1109/APMC46564.2019.9038220).
- [9] 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. doi: [10.11999/JEIT190275](https://doi.org/10.11999/JEIT190275).
- [10] CAO Tao, LIU Youjiang, YANG Chun, *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. doi: [10.11999/JEIT190275](https://doi.org/10.11999/JEIT190275).
- [11] FRANK W A. Sampling requirements for Volterra system identification[J]. *IEEE Signal Processing Letters*, 1996, 3(9): 266-268. doi: [10.1109/97.536597](https://doi.org/10.1109/97.536597).
- [12] 兰榕, 胡欣, 邹峰, 等. 基于循环平稳特性的欠采样宽带数字预失真研究[J]. 电子与信息学报, 2020, 42(5): 1274-1280. doi: [10.11999/JEIT190105](https://doi.org/10.11999/JEIT190105).
- [13] LAN Rong, HU Xin, ZOU Feng, *et al.* Research of low sampling frequency broadband digital predistortion with cyclostationary characteristics[J]. *Journal of Electronics & Information Technology*, 2020, 42(5): 1274-1280. doi: [10.11999/JEIT190105](https://doi.org/10.11999/JEIT190105).
- [14] KOEPL H and SINGERL P. An efficient scheme for nonlinear modeling and predistortion in mixed-signal systems[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2006, 53(12): 1368-1372. doi: [10.1109/TCSII.2006.882232](https://doi.org/10.1109/TCSII.2006.882232).
- [15] ZHU Anding, DRAXLER P J, YAN J J, *et al.* Open-loop digital predistorter for RF power amplifiers using dynamic deviation reduction-based volterra series[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2008,

- 56(7): 1524–1534. doi: [10.1109/TMTT.2008.925211](https://doi.org/10.1109/TMTT.2008.925211).
- [14] CAO Wenhui, LI Yue, and ZHU Anding. Digital suppression of transmitter leakage in FDD RF transceivers: aliasing elimination and model selection[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2018, 66(3): 1500–1511. doi: [10.1109/TMTT.2017.2772789](https://doi.org/10.1109/TMTT.2017.2772789).
- [15] YU Chao, GUAN Lei, ZHU Erni, *et al.* Band-limited volterra series-based digital predistortion for wideband RF power amplifiers[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2012, 60(12): 4198–4208. doi: [10.1109/TMTT.2012.2222658](https://doi.org/10.1109/TMTT.2012.2222658).
- [16] MA Yuelin, YAMA O Y, AKAIWA Y, *et al.* Wideband digital predistortion using spectral extrapolation of band-limited feedback signal[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers*, 2014, 61(7): 2088–2097. doi: [10.1109/TCSI.2013.2295897](https://doi.org/10.1109/TCSI.2013.2295897).
- [17] WANG Haoyu, LIU Falin, and TAO Wei. Robust and fast iterative algorithm based on Levenberg-Marquardt and spectral extrapolation for wideband digital predistortion of RF power amplifiers[C]. 2015 IEEE International Wireless Symposium (IWS 2015), Shenzhen, China, 2015: 1–4. doi: [10.1109/IWS.2015.7164579](https://doi.org/10.1109/IWS.2015.7164579).
- [18] LIU Youjiang, YAN J J, DABAG H T, *et al.* Novel technique for wideband digital predistortion of power amplifiers with an under-sampling ADC[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2014, 62(11): 2604–2617. doi: [10.1109/TMTT.2014.2360398](https://doi.org/10.1109/TMTT.2014.2360398).
- [19] YU Chao, LU Qianyun, YIN Hang, *et al.* Linear-decomposition digital predistortion of power amplifiers for 5g ultrabroadband applications[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2020, 68(7): 2833–2844. doi: [10.1109/TMTT.2020.2975637](https://doi.org/10.1109/TMTT.2020.2975637).
- [20] LI Yue, WANG Xiaoyu, and ZHU Anding. Sampling rate reduction for digital predistortion of broadband RF power amplifiers[J]. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2020, 68(3): 1054–1064. doi: [10.1109/TMTT.2019.2944813](https://doi.org/10.1109/TMTT.2019.2944813).
- [21] WANG Peiyuan and ZHOU Haiyun. Adaptive Landweber image reconstruction with an optimal presetting method[C]. 2013 Ninth International Conference on Natural Computation (ICNC), Shenyang, China, 2013: 1289–1293. doi: [10.1109/ICNC.2013.6818177](https://doi.org/10.1109/ICNC.2013.6818177).
- 蔡天赋：男，1997年生，博士生，研究方向为超宽带数字预失真。
李明玉：男，1978年生，副教授/博士生导师，博士，研究方向为射频电路与系统。
靳一：男，1984年生，高级工程师，博士，研究方向为卫星通信与网络。
徐常志：男，1985年生，高级工程师，博士生，研究方向为卫星通信与网络。

责任编辑：余蓉