

基于 QRD-RLS 的数字预失真算法的研究

李 飞^{1,2,3}, 黄 涛^{1,2,3}, 刘永飘^{1,2,3}, 陈东进^{1,2,3}

(1. 光纤通信技术和网络国家重点实验室, 湖北 武汉 430074; 2. 武汉邮电科学研究院, 湖北 武汉 430074;
3. 武汉虹信通信技术有限责任公司, 湖北 武汉 430074)

摘要: 文章对数字预失真(DPD)算法进行了研究,提出了一种采用 QR 分解来实现 3G 无线通信中宽带码分多址(WCDMA)射频功率放大器线性化的 DPD 算法,该算法能够自适应地改变滤波器的系数以达到补偿功放的非线性,仿真结果表明了其有效性和实用性。

关键词: QR 分解; 射频功率放大器; 数字预失真; 递归最小二乘法; 线性化

中图分类号: TN722 **文献标识码:** A **文章编号:** 1005-8788(2011)02-0064-03

Study on QRD-RLS-based digital predistortion algorithm

Li Fei^{1,2,3}, Huang Tao^{1,2,3}, Liu Yongpiao^{1,2,3}, Chen Dongjin^{1,2,3}

(1. State Key Laboratory of Optical Communication Technologies and Networks, Wuhan 430074, China;
2. Wuhan Research Institute of Post and Telecommunications, Wuhan 430074, China;
3. Wuhan Hongxin Communication Technologies Co., Ltd., Wuhan 430074, China)

Abstract: On the basis of the study on the Digital Predistortion (DPD) algorithm, this paper presents a DPD algorithm that accomplishes the linearization of WCDMA RF power amplifiers in 3G radio communications by using QR decomposition. It can adaptively alter the filter coefficient to compensate the nonlinearity of the power amplifiers. Simulation results indicate that this algorithm is effective and useful.

Key words: QR decomposition; RF power amplifier; digital predistortion; recursive least square; linearization

0 引 言

随着通信产业的不断发展,现代无线通信系统中广泛采用高频谱效率的线性调制方式,这对发射机的线性度提出了越来越高的要求。为了提高功率效率,一般让射频功率放大器在接近饱和点的位置工作,此时功率放大器的非线性变得非常严重,这会引起多载波信号产生互调失真和频谱扩展,导致邻信道功率比(ACPR)升高,接收机误码率增加,对邻近的信道造成干扰。

要解决功率效率和频谱效率间的矛盾,线性化技术显得尤为重要。关于大功率放大器的线性化有许多方法,如功率回退法、前馈线性化法、负反馈法以及数字预失真(DPD)等等。各种技术都有其优缺点,其中数字基带预失真技术精度高,适应性强,实现也相对简单,得到了广泛应用。

本文提出一种简单、高效的基于最小二乘法分解的预失真算法,结合 QR 分解实现对矩阵的计算,使得整个算法在硬件上容易实现。

1 DPD 算法原理

DPD 算法原理如下: 信号 $x(n)$ 在进入功放

(PA)之前先通过预失真器 B 得到与 PA 非线性特性相反的预失真信号 $a(n)$, $a(n)$ 通过 PA 后呈现出线性化的放大。算法的结构框图如图 1 所示。

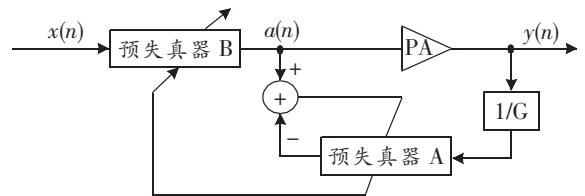


图 1 预失真算法结构框图

图中,预失真器 B 是先根据 PA 的模型设计出相应的滤波器对输入信号 $x(n)$ 进行处理,得到的结果与通过放大器后耦合为原信号功率的 $1/G$ (G 表示放大器的线性增益) 并再次滤波得到的结果进行比较,通过比较误差来调整滤波器的系数,最终达到误差为 0,即实现了功放的线性化。首先,设置滤波器高阶系数为 0,线性阶数为 1,带入信号流的运算中,通过预失真算法求得逆模型的参数;再将计算得到的确切的系数带入预失真器对输入信号 $x(n)$ 进行处理,这样得到的预失真信号 $a(n)$ 通过 PA 后在理想情况下可以达到线性化传输。

1.1 功率放大器模型

功放模型主要分为无记忆效应模型和有记忆效

应模型两种。当记忆效应的时间远小于输入信号的包络起伏时间时,可被认为是无记忆的或是准无记忆性的。此时,可以采用无记忆多项式模型、Ghorbani 模型或 Rapp 模型等。当功放的记忆效应时间与信号包络变化时间可以相比拟时,功放的记忆效应就不能再看作短暂性的,而要用带有记忆性的 Volterra 级数模型。

Volterra 级数模型是能够完整描述有记忆非线性系统的最为经典的模型。这种模型对有记忆非线性系统的自适应滤波非常有用,因为很多非线性系统都能够近似地用 Volterra 级数模型来建模。在级数中,作为因果离散时不变非线性系统输出的 $y(n)$ 是由输入信号 $x(n)$ 通过记忆深度为 L 的 Q 阶 Volterra 级数序列来表示的,具体如下:

$$y(n) = \sum_{p=1}^P \sum_{L=0}^{L-1} a_{pL} x(n-L) |x(n-L)|^{Q-1} \quad (1)$$

式中, a_{pL} 表示 p 阶 Volterra 级数的模型系数; $x(n)$ 和 $y(n)$ 分别为预失真器的输入和输出。定义式(1)中与系数相乘的信号单元为

$$u(n) = x(n-L) |x(n-L)|^{Q-1}, \quad (2)$$

则可以把级数写成

$$\mathbf{Y} = \mathbf{U}\mathbf{A}, \quad (3)$$

式中, $\mathbf{A}$ 表示系数向量; $\mathbf{U}$ 代表输入信号构成的多项式矩阵; $\mathbf{Y}$ 代表自适应滤波器的输出矩阵:

$$\mathbf{Y} = [y(0), \dots, y(N-1)]^T, \quad (N = L * Q)$$

$$\mathbf{U} = [\mathbf{U}_0, \dots, \mathbf{U}_Q],$$

其中,

$$\mathbf{U}_q = [x(n-1) | x(n-1) |^{q-1}, x(n-2) | x(n-2) |^{q-1}, \dots, x(n-L) | x(n-L) |^{q-1}], \quad q = 1, 2, \dots, Q,$$

$$\mathbf{A} = [a_{10}, \dots, a_{L0}; \dots; a_{LQ}, \dots, a_{LQ}].$$

根据最小二乘法,可得:

$$\mathbf{A} = (\mathbf{U}^H \mathbf{U})^{-1} \mathbf{U}^H \mathbf{Y}. \quad (4)$$

这样的算法看起来很简单,但硬件实现却很困难。关键就在于对 $\mathbf{U}^H \mathbf{U}$ 求逆的这一步。本文提出一种基于 QR 分解的算法来解决这一问题。

1.2 基于 Givens 旋转的 QR 分解

矩阵的 QR 分解将非奇异系数矩阵分解为正交矩阵 $\mathbf{A}$ 与上三角矩阵 $\mathbf{R}$ 的积(假设矩阵 $\mathbf{A}$ 为 $m \times n$ 矩阵,元素用 a_{ij} ($0 \leq i < m, 0 \leq j < n$) 来表示): $\mathbf{A} = \mathbf{Q}\mathbf{R}$ 。其中, $\mathbf{Q}$ 是一个 $m \times m$ 的正交矩阵(意味着 $\mathbf{Q}^T \mathbf{Q} = \mathbf{I}$),而 $\mathbf{R}$ 是上三角矩阵。QR 分解的实际计算有很多方法,例如 Givens 旋转、Householder 变换,以及 Gram-Schmidt 正交化等等。每

一种方法都有其优点和不足。在这里我们采用 Givens 旋转的方法。

脉动阵列的处理结构适合用硬件来实现,并且并行的处理方式速度更快,因此,我们用基于脉动阵列的方法来实现 Givens 旋转。其结构如图 2 所示。

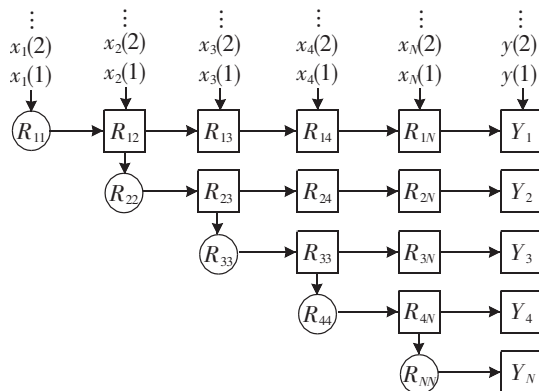


图 2 脉动阵列结构图

我们将式(4)等号两边都乘以 $\mathbf{U}^H \mathbf{U}$, 得到 $(\mathbf{U}^H \mathbf{U})\mathbf{A} = \mathbf{U}^H \mathbf{Y}$, 令 $\mathbf{U}^H \mathbf{U} = \mathbf{R}$, $\mathbf{U}^H \mathbf{Y} = \mathbf{Y}'$, 则有

$$\mathbf{R}\mathbf{A} = \mathbf{Y}'. \quad (5)$$

在 $n-1$ 时刻, $X(n-1)$ 和 $Y(n-1)$ 的元素被存储在阵列单元中。到来的新的输入数据从顶部进来, 传播到下部。Givens 选择参数在边界单元中计算出来, 从左边传播到右边。内部的单元从左边接收旋转参数, 从顶部对数据做旋转运算, 然后把结果传到右边和下面的单元。这个过程在每个新的数据到来时都要重复进行, 直到需要计算的数据全部输入。

圆形和矩形分别称为边界单元和内部单元。信号进入到单元内部会进行不同的运算。其算法分别如下:

(1) 边界单元: 设 A_{in} 代表单元本身存储的元素, r_{ij} 代表从第 i 行第 j 列输入的信号。

$$mod = \sqrt{A_{in}^2 + r_{ij}(n)^2}, \quad c = \frac{r_{ij}(n)}{mod}, \quad s = \frac{A_{in}}{mod}.$$

(2) 内部单元:

$$A_{out} = c * A_{in} - s * r_{ij}(n),$$

$$r_{ij}(n+1) = c * r_{ij}(n) + s * A_{in}.$$

经过脉动阵列的计算, 式(5)变为上三角矩阵 $\mathbf{R}$, 即 $\mathbf{R}\mathbf{a} = \mathbf{Y}$, $\mathbf{R}\mathbf{a} = \mathbf{Y}'$, 到了这一步, 很容易就可以通过上三角矩阵 $\mathbf{R}$ 和 $\mathbf{Y}$ 计算得到系数 $\mathbf{A}$ 了。

1.3 算法计算量分析

除了性能以外, 计算量大小也是影响一个算法好坏的重要因素。在基于 QR 分解的递归最小二乘法(QRD-RLS)中, 完成一次系数更新所需要的计算量如下: 输入信号在构成前向链路的过程中需要

用到 48 次乘法运算和 4 次开方运算,滤波过程的计算量是 40 次乘法运算。在反馈链路中,计算阵列输入信号与前向链路一样,需要 48 次乘法和 4 次开方。在脉动阵列中,则需要 2 280 次乘法,这个计算由硬件完成,其优点是计算速度与软件相比更快。最终通过三角矩阵计算系数的过程中,计算量则较小,只需要 190 次乘法和 20 次除法。

总体上,系数更新一次需要由软件完成 326 次乘法运算,20 次除法和 8 次开方运算,由硬件完成 2 280 次乘法运算。

2 仿真结果及分析

为了检验算法的效果,我们在 MATLAB 平台下进行了仿真。结果如图 3 所示。

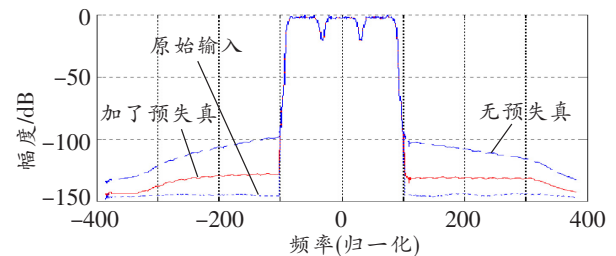


图 3 仿真结果

输入信号采用的是 Xilinx 公司提供的 3 载波宽带码分多址(WCDMA)信号,15 MHz 带宽,峰均比为 8.17 dB。预失真模型采用具有 7 阶非线性、4 阶记忆性的记忆多项式模型。

功率放大器的非线性主要体现在信号频谱扩展、产生互调失真和造成误比特率的增加等方面。因此,系统改善的性能指标主要从带外频谱来考察。图 3 中给出了信号在系统中各处的频谱图,其中点线是原始输入信号的频谱,虚线表示信号直接通过功放后输出的频谱,实线表示信号通过预失真处理后再通过功放的输出频谱。从图中可以看出,经过预失真处理后,相比信号直接进入功放,带外频谱改善约 30 dB。

3 算法比较

目前常用的预失真方法主要有预失真芯片和软件方法。经过测试、比较得知各种方法的性能如表 1 所示。从表 1 可知,TI 公司的预失真芯片 GC5328

在任意载波的码分多址(CDMA)信号环境下,可以改善 ACPR 约 20 dB。Xilinx 公司的 DPD 核对 3 载波的 WCDMA 信号,50 W 功放条件下 ACPR 能够改善 15 dB 左右。而 QRD-RLS 算法在 Altera 的现场可编程门阵列(FPGA)芯片中,在同样的环境中,ACPR 改善 16 dB 左右。

表 1 各种方案性能比较

实现方法	测试信号	改善效果
TI GC5328	任意载波 CDMA	20 dB
Xilinx 的 DPD 核	3 载波 WCDMA	15 dB
Altera 的 QRD-RLS 算法	3 载波 WCDMA 或者 9 载波 TD-SCDMA	16 dB

结果显示,TI 公司的专用芯片有很好的改善效果,但芯片的使用增加了开发成本。相比较而言,在 FPGA 上运用软件实现 QRD-RLS 算法由于具有低成本、灵活和可移植性等优点而具备更大的优势。

4 结束语

本文提出了一种简单、高效的预失真方法——QRD-RLS 算法,其特点是收敛速度快,且非常适合在硬件中实现,降低了其他算法由于计算复杂而无法用硬件实现的困难。仿真结果表明,该算法能有效抑制带外频谱扩散,ACPR 改善约 30 dB,提高了功放的效率,成功实现了高功率放大器的线性化,是实现功放线性化的一种有效的方案。

参考文献:

[1] Morgan D R, Ma Z X, Kim J Y. A generalized memory polynomial model for digital predistortion of RF power amplifiers [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2006, 54 (10): 3852-3860.

[2] Kim J, Konstantinou K. Digital predistortion of wide-band signals based on power amplifier model with memory [J]. Electronics Letters, 2001, 37(23): 1417-1418.

[3] Haykin S. 自适应滤波器原理 [M]. 郑宝玉等(译). 北京:电子工业出版社,2006.

[4] Manolakis D G. 统计与自适应信号处理 [M]. 周正(译). 北京:电子工业出版社,2002.

[5] 钱业青. 一种高效的用于 RF 功率放大器线性化的自适应预失真结构 [J]. 通信学报, 2006, 27(5): 35-35.