

文章编号: 1001 - 893X(2011)05 - 0109 - 05

放大器估计器的查表法自适应预失真器设计*

张 颂¹, 文 红^{1,2}, 张高远¹, 任详维¹

(1. 电子科技大学 通信抗干扰技术国家级重点实验室, 成都 611731; 2. 东南大学 移动通信国家重点实验室, 南京 210096)

摘 要:非线性功放特性随温度, 供电电压等因素的变化而改变, 为保证其稳定工作, 预失真系统的自适应性能就显得非常重要。当前的自适应预失真算法每次都对其参数进行更新, 计算量很大。针对这个问题提出了一种放大估计器的查表法自适应预失真算法, 将查表法和放大器估计器法结合在一起, 以误码率为指标在系统允许的误差范围内可以大大减少参数的迭代次数。同时针对不同的输入回退, 可以选择采用不同的预失真算法, 从而使其更加接近功放特性, 进一步减少迭代次数。

关键词:深空通信; 功率放大器; 自适应预失真算法

中图分类号: TN91 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-893x.2011.05.023

A New Adaptive Predistorter Based on Estimator and LUT

ZHANG Song¹, WEN Hong^{1,2}, ZHANG Gao-yuan¹, REN Xiang-wei¹

(1. National Key Lab of Communication, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, China; 2. National Mobile Communications Research Laboratory, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The characteristics of non-linear amplifier change with temperature and supply voltage. In order to ensure stability of amplifier, the adaptive predistortion becomes very important. To solve the problem of large computation of existing adaptive predistortion algorithms, a new digital adaptive predistorter is designed in this paper. Combining estimator and look-up table method(LUT), and also by setting bit error rate(BER) as an indicator, the iteration times can be significantly reduced when BER is lower than the standard one. At the same time, for different input back-off (IBO), different predistortion algorithms can be chosen, so the system can get better result and iteration times can be further reduced.

Key words: deep space communication; power amplifier; adaptive predistortion algorithm

1 引 言

深空通信中为了得到高的放大效率, 需要使功放运行点在饱和状态, 造成功率放大器的非线性, 信号产生了失真, 预失真是抵抗信号失真的重要方法。在频谱资源日益紧张的今天, 非恒定包络调制方式具有相对较高的频谱利用率, 但对功率放大器的线性度提出很高的要求。为了有效地改善这种现象, 通常采用

功率放大器的线性化技术对链路进行非线性补偿, 目前常用的线性化技术有前馈法、反馈法、预失真法、用非线性部件实现线性化^[1]等, 但功率放大器的非线性特性随温度、供电电压等因素的变化而改变, 预失真系统的自适应性能也显得非常重要^[2]。

目前, 自适应基带预失真法是一种被广泛采用的线性化方法, 其优点是在基带部分利用数字信号处理技术, 对输入信号进行自适应预失真处理, 实现较为简单, 而对系统非线性的改善却十分明显。数

* 收稿日期: 2011 - 01 - 10; 修回日期: 2011 - 03 - 24

基金项目: 东南大学移动通信国家重点实验室开放研究基金项目(2010D05); 国家自然科学基金(61071100, 61032003)及新世纪优秀人才计划(NCET - 09 - 0266)联合资助项目

Foundation Item: The Open Research Fund of National Mobile Communications Research Laboratory of Southeast University (2010D05); The National Natural Science Foundation of China (No. 61071100, 61032003)

字基带自适应预失真主要有基于查表和多项式逼近两大类方法。基于多项式的预失真器易于补偿深度压缩的功放特性,但是由于多项式阶数的限制,预失真器的应用局限于对特性曲线较规则的功放进行线性化;基于查表的预失真器能够跟踪各种功放特性曲线,具有更广泛的应用,但是由于查找表的大小限制,会引入量化失真,加大查找表又会导致收敛速度过慢^[3]。针对这些问题,本文将放大器估计法和查表法结合在一起,分别用多段直线或曲线来逼近幅度失真和相位失真曲线,通过取直线或曲线函数的逆函数来逼近放大器的逆特性,以误码率为指标在系统允许的误差范围内大大减少参数的迭代次数,同时针对不同的输入回退,选择采用不同的预失真算法,进一步减少迭代次数,降低了系统复杂度。

2 预失真的基本原理

减少发射端大功率放大器的非线性失真最有效的方法之一是在放大器之前加一个预失真器,如图1所示。

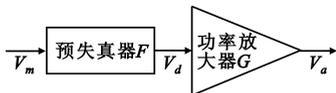


图1 预失真与功率放大器模块

Fig.1 Predistortion and power amplifier module

要使整个系统达到线性输出,必须有:

$$F(|V_m|) \cdot G(|V_d|) = K \quad (1)$$

我们可以从预失真表中得到在输入信号样点时的大功率放大器的逆特性增益 $F(|V_m|)$,然后将输入信号乘以 $F(|V_m|)$ 再经过放大器特性 $G(|V_d|)$ 即可以达到线性。图2所示为饱和点归一化幅度为1的功率放大器的非线性特性^[4]。预失真特性可以用放大器的逆特性——关于 $x = y$ 对称的曲线来表示。在放大器之前乘以预失真特性,然后与放大器的非线性特性级联,在放大器的输出端就得到线性的特性。

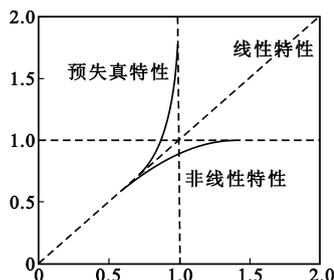


图2 大功率放大器的非线性特性

Fig.2 Non-linear characteristics of HPA

3 放大器的非线性特性

输入信号为

$$x(t) = F(t) \exp[j\theta(t)] \quad (2)$$

式中, $F(t) = |x(t)|, \theta(t) = \arg\{x(t)\}$ 。

分别通过函数 $A(\rho)$ 和 $\Phi(\rho)$ 来定义 AM/AM (与输入幅度有关的幅度失真)和 AM/PM (与输入幅度有关的相位失真)对非线性的响应, ρ 是输入幅度。非线性放大器输出值为

$$y(t) = A(\rho) \exp[j\{\theta(t) + \Phi(\rho)\}] \quad (3)$$

行波管(TWTA)放大器模型的非线性设备模型函数为

$$A(\rho) = \frac{\alpha_a \rho}{(1 + \beta_a \rho^2)} \quad (4)$$

$$\Phi(\rho) = \frac{\alpha_\phi \rho^2}{(1 + \beta_\phi \rho^2)} \quad (5)$$

式中, $\alpha_a, \beta_a, \alpha_\phi, \beta_\phi$ 为迭代系数。在本次仿真中用的是行波管(TWTA)放大器模型。

放大器的工作点通常由“回退”来确定。输入回退(IBO)定义为

$$IBO = 10 \lg(P_{i_sat}/P_i) \quad (6)$$

式中, P_{i_sat} 为饱和点的输入功率, P_i 为平均输入功率。

4 放大器估计器的预失真算法

4.1 拟合算法原理

拟合算法是通过通过对大功率放大器的非线性特性进行分段估计,然后对其逐段取逆变换来调节大功率放大器预失真器的非线性参数,以达到预失真补偿的目的^[5]。

我们用一个函数来逼近 AM/AM 和 AM/PM 曲线,那么可以利用它的逆函数来逼近放大器的逆特性。放大器特性曲线的逼近通常有直线拟合和非线性拟合两种方法,其分别用多段直线或曲线来逼近 AM/AM 和 AM/PM 曲线,通过取直线或曲线函数的逆函数来逼近放大器的逆特性。这种功能由 HPA 估计器来实现。

采用直线拟合的原理如图3所示。对输入信号 $x(k)$ 的幅度进行均匀量化, $R_i (i \in \{1, 2, \dots, N\})$ 表示输入信号幅度的第 i 个量化区间。在每个量化区间内用一个直线函数 $|v(k)| = a_i(|x(k)| - x_i) + b_i$ 来拟合放大器的非线性,其中 x_i 为第 i 个量化区间的起始值, b_i 为当 $x(k)$ 取值 v_i 时的纵坐标值, a_i 为

第 i 个量化区间的斜率。 a_i 值可由下式计算得出:

$$a_i = \frac{b_{i+1} - b_i}{x_{i+1} - x_i} \quad (7)$$

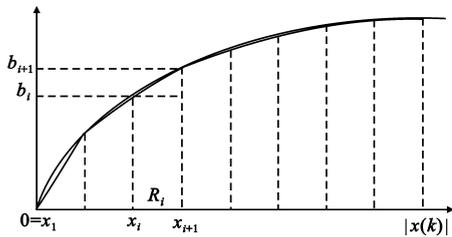


图 3 直线拟合原理图

Fig.3 Principle diagram of linear fitting

同样,用一个曲线函数 $|v(k)| = \frac{a_i |x(k)| + b_i}{c_i |x(k)| + d_i}$ 来逼近 AM/AM 和 AM/PM 曲线,取它的逆函数来逼近放大器的逆特性,其原理与直线拟合相同。

4.2 基于放大器估计器的预失真算法

由于放大器的 AM/AM 和 AM/PM 特性是相互无关的,因此它们可以独立估计。预失真系统方框图如图 4 所示, $x(k)$ 为输入信号, $\tilde{u}(k)$ 为预失真器的输出,即预失真器对 HPA 估计器输出的非线性失真取逆变换后的信号,此逆变换信号 $\tilde{u}(k)$ 用来对功率放大器的非线性进行预校正^[6]。

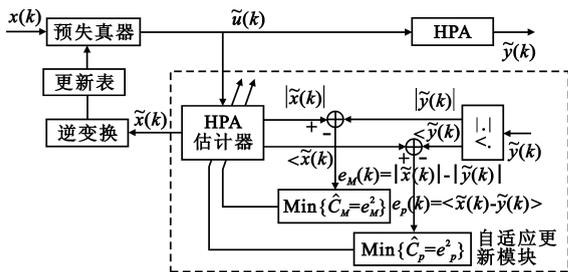


图 4 放大器估计器的预失真系统方框图

Fig.4 The block diagram of predistortion system

考虑到大功率放大器的时变特性,为了得到准确的估计,用估计器的输出 $\tilde{x}(k)$ 与大功率放大器经下变频解调输出 $\tilde{y}(k)$ 的幅度和相位进行差分得到两个误差信号 $e_M(k)$ 和 $e_P(k)$,由误差估计式 $\hat{C}_M = e_M^2$ 和 $\hat{C}_P = e_P^2$ 的极小化原则,其对参数的导数值应为 0,同时采用随机梯度法来调节估计器的参数,使估计器能及时跟踪放大器的特性变化,之后把更新值存入表中,以便达到自适应估计的目的。

5 预失真器设计思路和方法

图 5 所示为其基本结构,预失真器包括直线曲

线拟合预失真算法、查找表、计算误码率和自适应更新算法。 $x(k)$ 为输入信号, $\tilde{u}(k)$ 为预失真器的输出, $\tilde{y}(t)$ 为射频发送信号; $\hat{y}(k)$ 是接收信号 $\tilde{y}(t)$ 经过解调、A/D 转换后的信号, $\hat{y}(k)$ 与 $x(k)$ 比较错误比特数为 $\sum_{i=1}^N |\hat{y}(i) - x(i)|$,信号总比特数为 N ,误码率计算为

$$e = \frac{\sum_{i=1}^N |\hat{y}(i) - x(i)|}{N} \quad (8)$$

设 η 为误码率门限,若 $e > \eta$,进行自适应更新查找表;若 $e \leq \eta$,不需要更新表,直接输出 $\hat{y}(k)$ 。

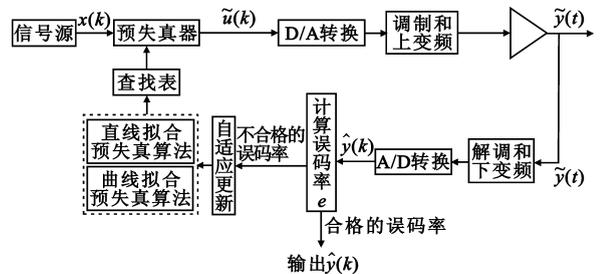


图 5 放大器估计器的查表法自适应预失真基本结构图

Fig.5 The system diagram of new adaptive predistorter based on estimator and LUT

直线曲线拟合预失真算法采用两种预失真算法,当输入回退比较高的时候,采用直线预失真,其参数比较少,可以大大减少计算量;当输入回退较小时采用曲线预失真。同时,这两种预失真算法都能使输出很好地达到线性,并且只需要对其分 10 段,即每个参数只有 10 个值,存储量也比较小。

当调用预失真算法的时候,直接查找表,同时导入表中的参数计算预失真器的输出。由于表中只存储 10 段,所以很容易查找到。

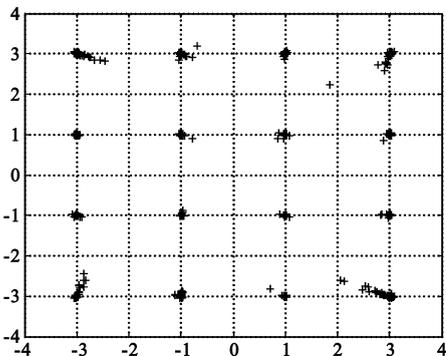
为了保证随时跟踪放大器的非线性特性,必须及时更新参数值。现阶段提出的算法是每次都对参数进行更新,这样每次的计算量都很大,而估计算法采用误码率为指标,只有当误码率超出合格的值时才更新表,当误码率在合格的范围内时则不需要更新参数,其对系统性能没有太大的影响,这样既实现了自适应,又减少了计算量。

6 仿真与分析

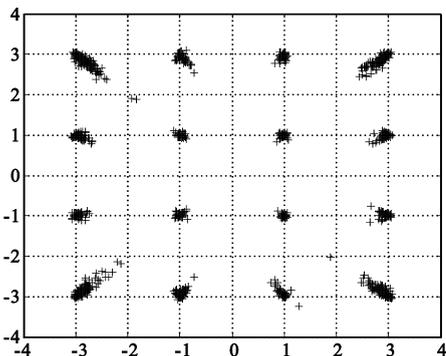
在仿真中,我们使用 1 024 个点的 16QAM 调制解调,过采样因子取 4。采用 TWT 放大器,取参数

$\alpha_a = 2.0, \beta_a = 1.0, \alpha_\phi = \pi/3, \beta_\phi = 1.0$, 调制的信号幅度都归一化为 1, 加入高斯噪声, 线性分段采用 10 段。经过 Matlab 仿真, 每段的参数(幅值、相位)收敛的趋势是一致的, 表明所选择的非线性函数能较好地拟合大功率放大器的非线性特性。

图 6 中(a)和(b)分别为采用直线拟合和曲线拟合预失真法, 输入回退在 4.5 dB 和 3 dB 时候的星座图。从图中得出当没有预失真时有明显的幅度和相位失真, 经过预失真后幅度相位失真完全抵消。



(a) IBO = 4.5 dB 直线拟合



(b) IBO = 3 dB 曲线拟合

图 6 预失真输出星座图

Fig.6 Predistorter output constellation

图 7 为在 IBO = 4.5 dB 下直线拟合预失真后和在 IBO = 3 dB 下曲线拟合预失真后的误码率曲线图。

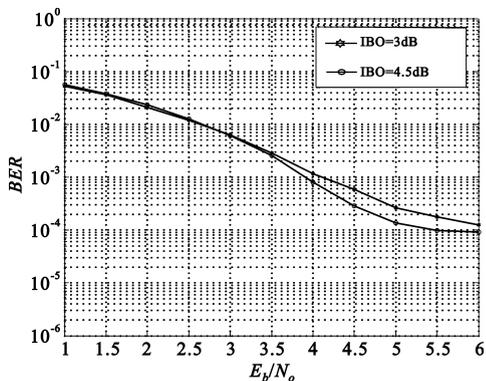


图 7 误码率

Fig.7 Curve diagram of BER

经过大量的仿真可看出, 当输入回退小于 6 dB 时, 线性拟合的误码率要高, 所以在输入回退小于 6 dB 时用曲线拟合算法进行预失真, 当大于 6 dB 时用直线拟合算法, 这样既可以减小计算量, 又可以使输出达到很好的线性。

取误码率最高为 10^{-3} , 当误码率大于 10^{-3} 时, 调用自适应更新算法, 更新表; 当误码率小于 10^{-3} 时, 则不对表作任何的修改直接输出。这样, 既达到了自适应预失真的目的, 同时也不需要每次都对表进行更新, 大大减少了计算量。

用 -1 到 1 的 4 个随机 4 位小数改变放大器模型函数的 4 个参数 $\alpha_a, \beta_a, \alpha_\phi, \beta_\phi$, 调用此预失真器, 仿真结果如表 1 所示。

表 1 基于放大器估计器的查表法自适应预失真器的仿真结果

Table 1 The simulation results of the new adaptive predistorter based on estimator and LUT

IBO/dB	α_a	β_a	α_ϕ	β_ϕ	初始表的 BER_linear or BER_curve	自适应更新后 BER
3.0	2.570 0	0.190 0	1.587 2	0.790 0	BER_curve = 0.109 0	6.103 5e - 005
4.5	1.220 0	0.290 0	1.907 2	0.120 0	BER_curve = 0.247 6	1.220 7e - 004
6.0	2.490 0	1.180 0	1.637 2	0.380 0	BER_linear = 6.713 9e - 004	6.713 9e - 004
7.5	1.940 0	1.010 0	0.837 2	0.560 0	BER_linear = 1.220 7e - 004	1.220 7e - 004
9.0	1.770 0	0.060 0	1.097 2	1.060 0	BER_linear = 0.001 3	0

7 结 论

本文设计了一种放大器估计器的查表法自适应预失真器,将放大器估计法和查表法结合在一起,分别用多段直线或曲线来逼近 AM/AM 和 AM/PM 曲线,通过取直线或曲线函数的逆函数来逼近放大器的逆特性,同时用误码率为指标确定是否要进行自适应更新算法。由仿真结果可以看出,系统对功放的线性化效果理想,而且实现难度不高,存储数据数量较少,迭代次数较少,可以很好地消除功率放大器所引起的失真,而且不显著增加系统的复杂度。

参考文献:

- [1] ETSI ETS 300 744, Digital Video Broadcasting (DVB) Frame structure, channel coding and modulating on for digital terrestrial television on (DVB-T)[S].
- [2] Chen H-H, Lin C-H, Huang P-C, et al. Polynomial and look-up-table predistortion power amplifier linearization[J]. IEEE Transactions on Circuits System II, 2006, 53(8): 612-616.
- [3] Horiuchi Takaaki, Yang W, Otsuki Tomoaki, et al. Performance evaluation of OFDM with the compensation technique of nonlinear distortion using partial transmits sequence and predistortion[J]. IEIC Technical Report, 2001, 101(56): 1-6.
- [4] YANG Wen-kao, ZHOU Shang-b, ZHU Wei-le. Adaptive predistortion technology based on piecewise nonlinear function[C]//Proceedings of IEEE 2002 International Conference on Communications, Circuits and Systems and West Sino Expositions. Chengdu, China: IEEE, 2002.
- [5] 杨文考. 多载波 OFDM 数字电视系统中放大器的自适应预失真技术研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2002.

YANG Wen-kao. Adaptive predistortion technology in Digital TV system of multicarrier OFDM[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2002. (in Chinese)

- [6] Georges Karam, Hikmet Sari. Data predistortion technique with memory for QAM radio systems[J]. IEEE Transactions on Communications, 1991, 39(2): 336-344.

作者简介:

张 颂(1985—),女,山西平遥人,硕士研究生,主要研究方向为移动通信;

ZHANG Song was born in Pingyao, Shanxi Province, in 1985. She is now a graduate student. Her research direction is mobile communication.

Email: zhangstian@126.com

文 红(1969—),女,四川人,副教授、博士生导师,主要研究方向为移动通信;

WEN Hong was born in Sichuan Province, in 1969. She is now an associate professor and also the Ph.D. supervisor. Her research direction is mobile communication.

Email: sunlike@uestc.edu.cn

张高远(1984—),男,河南人,电子科技大学通信抗干扰国家级重点实验室博士研究生,主要研究方向为移动通信;

ZHANG Gao-yuan was born in Henan Province, in 1985. He is currently working toward the Ph.D. degree. His research direction is mobile communication.

Email: zhanggaoyuan407@163.com

任祥维(1986—),男,山西孝义人,电子科技大学通信抗干扰国家级重点实验室硕士研究生,主要研究方向为移动通信。

REN Xiang-wei was born in Xiaoyi, Shanxi Province, in 1985. He is now a graduate student. His research direction is mobile communication.

Email: ren.xian.v@163.com