

OFDM 系统中记忆非线性功放基带预失真技术

谭水, 王光明, 梁建刚

(空军工程大学 导弹学院, 陕西 三原 713800)

摘要:研究了 OFDM 系统的自适应基带预失真技术。针对 OFDM 信号的高峰值平均功率比对非线性功率放大器敏感的特点,并考虑 OFDM 的宽带特性引起的功放记忆非线性效应,提出了一种基于辨识方案的非直接学习结构的自适应基带预失真技术,给出了自适应算法。仿真结果表明,该方案能有效抑制带外频谱扩散,减小带内失真,实现有记忆非线性大功率放大器(HPA)的自适应预失真。

关键词:正交频分复用;预失真;记忆非线性失真;非直接学习结构

中图分类号: TN39 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2006)04-0064-04

OFDM(正交频分复用)技术作为一种多载波调制技术,与单载波调制技术相比,调制信号具有较大的峰值平均功率比(PAPR),其包络具有较大的动态范围,因此要求其功率放大器也必须有较大的线性范围,否则将会导致大信号非线性失真。另外,OFDM 信号的宽带特性也产生记忆非线性失真,因而解决 OFDM 信号对功率放大器非线性敏感也就成为了 OFDM 系统的核心技术之一。数字基带预失真线性化技术是补偿放大器非线性失真最好的方法之一,但是目前对预失真技术的研究大多局限于无记忆非线性放大器,这是由于当信号带宽远小于放大器带宽时,记忆效应可以忽略,而对于宽带应用,放大器的记忆效应明显,若仍采用传统的无记忆预失真技术,非线性补偿机制可能失效或效果不佳。因此,研究有记忆非线性功放的基带预失真技术是一个非常重要的问题。

1 OFDM 信号与 HPA 模型

对于一个具有 N 个子载波的 OFDM 系统,如果其信号周期为 T ,则在一个周期内 OFDM 的复等效基带信号可写为如下形式:

$$s(t) = \sum_{k=0}^{N-1} d(k) \exp\left[j2\pi \frac{k}{T}t\right] \quad 0 \leq t \leq T \quad (1)$$

其中 $d(k)$ 为分配给每个子信道的数据符号(MQAM 或 QPSK 符号)。可以看到,OFDM 信号可以认为是独立同分布的随机变量的线性组合,即其传输信号的包络非恒定。当子载波数目很大时,由中心极限定理可知,OFDM 信号近似服从复高斯分布,幅度服从瑞利(Rayleigh)分布,具有很高的峰值平均功率比,加上 OFDM 信号的宽带特性引入记忆非线性失真,这对发射机中的大功率放大器的线性度提出了很高的要求。

当传送宽带信号时,OFDM 发射机中射频大功率非线性放大器(HPA)的记忆效应不能忽略^[1]。记忆特性效应意味着一种滤波效果,这种效果由依赖于频率的非线性特性部分体现。通常可以采用 Wiener 模型(即线性时不变系统(LTI)串连无记忆非线性模型)来模拟宽带应用中功放的记忆非线性。放大器基带等效模型如下式(2)所示(在本文中,设 Wiener 模型中 LTI 部分为无限冲击响应(IIR)模型,无记忆非线性部分为一奇次多项式模型)。

收稿日期:2005-09-04

作者简介:谭水(1976-),男,四川三台人,博士生,主要从事微波电路与系统、电磁兼容等研究;

王光明(1964-),男,安徽砀山人,教授,博士生导师,主要从事电磁散射与辐射,微波电路与系统等研究。

$$y(n) = - \sum_{p=1}^M \alpha_p w(n-p) + \sum_{q=0}^N \beta_q \left(\sum_{k=0}^L d_{2k+1} y(n-q) |y(n-q)|^{2k} \right) \quad (2)$$

放大器各参数的取值分别为: $\alpha_1 = -0.2, \beta_1 = 1, \beta_2 = 0, \beta_3 = 0.3; d_1 = 6.3393 - 0.3458j, d_3 = -1.1078 + 1.2090j, d_5 = 0.0789 - 0.2240j$ 。

2 非直接学习结构自适应预失真方案

2.1 非直接学习结构的 Hammerstein 预失真器

预失真器的自适应采用非直接学习结构^[2]。采用非直接学习结构的好处是可以不需要先辨识出放大器的模型就可以直接辨识出预失真器的模型参数,结构简单。在此结构中,预失真器与预失真器训练网络具有完全相同的结构。放大器的输出采样 $y(n)$ 经尺度变换后作为训练网络的输入,训练网络的输出 $\hat{z}(n)$ 与放大器的输入采样 $z(n)$ 进行比较,误差 $e(n)$ 用于预失真器的自适应。当训练网络收敛后,即可将训练网络的参数完全复制到预失真器。预失真器通过周期性地更换系数,可以自适应功率放大器特性的缓慢变化。

对于有记忆非线性功率放大器,为补偿非线性,其逆特性也应具有记忆效应。由于 OFDM 系统发射机中记忆非线性大功率放大器 (HPA) 采用 Wiener 模型,因此预失真器采用 H 模型 (Hammerstein 模型,即无记忆非线性模型串连线性时不变系统) 模拟非线性功放的逆特性。

2.2 预失真器的自适应算法

在预失真器方案中,我们的目的是希望预失真器的输入 $x(n)$ 和记忆非线性功放的输出 $y(n)$ 满足线性关系,即 $y(n) = Gx(n)$,其中 G 为放大器的增益。若以 $y(n)/G$ 作为预失真训练网络的输入,则训练网络的基带等效输入输出关系如下:

$$v(n) = \sum_{k=0}^K c_{2k+1} \frac{y(n)}{G} \left| \frac{y(n)}{G} \right|^{2k} \quad (3)$$

$$\hat{z}(n) + \sum_{p=1}^P a_p \hat{z}(n-p) = \sum_{q=0}^Q b_q v(n-q) \quad (4)$$

$$\hat{z}(n) = - \sum_{p=1}^P a_p \hat{z}(n-p) + \sum_{q=0}^Q b_q \left(\sum_{k=0}^K c_{2k+1} \frac{y(n-q)}{G} \left| \frac{y(n-q)}{G} \right|^{2k} \right) \quad (5)$$

即在 H 模型预失真器中,无记忆非线性部分我们采用奇次多项式模型, LTI 部分采用 IIR 模型。因为假定 $x(n)$ 、 $y(n)$ 满足线性关系,所以误差信号满足 $e(n) = z(n) - \hat{z}(n) = 0$ 。

如果非线性功放的输入输出 $x(n)$ 和 $y(n)$ 已知的话,那么接下来的工作是如何估计出预失真器的参数来实现预失真器。预失真器的参数估计是一个典型的 H 模型辨识问题。关于 H 模型的辨识, NG (Narendra - Gallman) 算法^[3-4] 由于简单、稳定可靠而得到了广泛的应用,因此本文采用 NG 算法对预失真器各参数进行估计。

假定预失真器训练网络 IIR 模型各参数初始值 (分别记为 $a_p^{(0)}$ 和 $b_q^{(0)}$) 已知,则经过第 i 次迭代后有:

$$z(n) + \sum_{p=1}^P a_p^{(i)} z(n-p) = \sum_{q=0}^Q b_q^{(i)} u_{2k+1}(n) \quad (6)$$

其中 $u_{2k+1}(n) = \sum_{q=0}^Q b_q^{(i)} \frac{y(n-q)}{G} \left| \frac{y(n-q)}{G} \right|^{2k}$ 。可将式(6)写成矩阵的形式:

$$z + Z\mathbf{a}^{(i)} = U\mathbf{c} \quad (7)$$

则由式(7)可以得到 \mathbf{C} 的最小二乘解为

$$\hat{\mathbf{c}}^{(i+1)} = (\mathbf{U}^H)^{-1} \mathbf{U}^H (z + Z\mathbf{a}^{(i)}) \quad (8)$$

已知 $\hat{\mathbf{c}}^{(i+1)}$, 又由式(2)、(3) 可得:

$$z = -Z\mathbf{a} + V\mathbf{b} = [-ZV] \begin{bmatrix} \mathbf{a} \\ \mathbf{b} \end{bmatrix} \quad (9)$$

因此 \mathbf{a} 和 \mathbf{b} 的最小二乘解为

$$\begin{bmatrix} \hat{\mathbf{a}}^{(i+1)} \\ \hat{\mathbf{b}}^{(i+1)} \end{bmatrix} = ([ZV]^H [ZV])^{-1} ([ZV]^H z) \quad (10)$$

通过式(9)得到 a 和 b 新的估计 $\hat{a}^{(i+1)}$ 和 \hat{b} 后,可以返回式(6)进行新的迭代,直到算法收敛。预失真器训练网络通过上面给出的算法,不断更新预失真器的参数,以达到对 HPA 逆特性的逼近。

3 仿真结果

为了考察本文所提方案算法的有效性,采用 Matlab 进行仿真验证。由式(1)可知,放大器模型 LTI 部分为一单极点、双零点系统,与此对应,H 模型预失真器中 LTI 部分我们采用双极点、单零点模型。预失真器无记忆非线性部分采用 5 阶奇次多项式模型,功放增益 $G=5$ 。OFDM 系统中,假设信道是理想模型,没有符号间干扰,并忽略保护间隔影响。OFDM 符号子载波数为 1 024,64QAM 星座调制,在功放前,调制的 OFDM 信号幅度都归一化为 1。

由于大功率放大器非线性失真的影响,输出信号产生畸变。图 1(a)和图 1(b)分别为不考虑记忆效应和考虑记忆效应,放大器输入功率回退 5 dB 时,没有预失真时接收端解调信号星座图,可以看出非线性功放的记忆效应加剧了输出信号的畸变。图 1(c)是记忆非线性功放经过预失真后,接收端解调信号的星座图,比较图 1(b)和图 1(c)可以看出,记忆非线性功放过预失真后,输出信号的幅度和相位都得到了较大的校正和补偿。

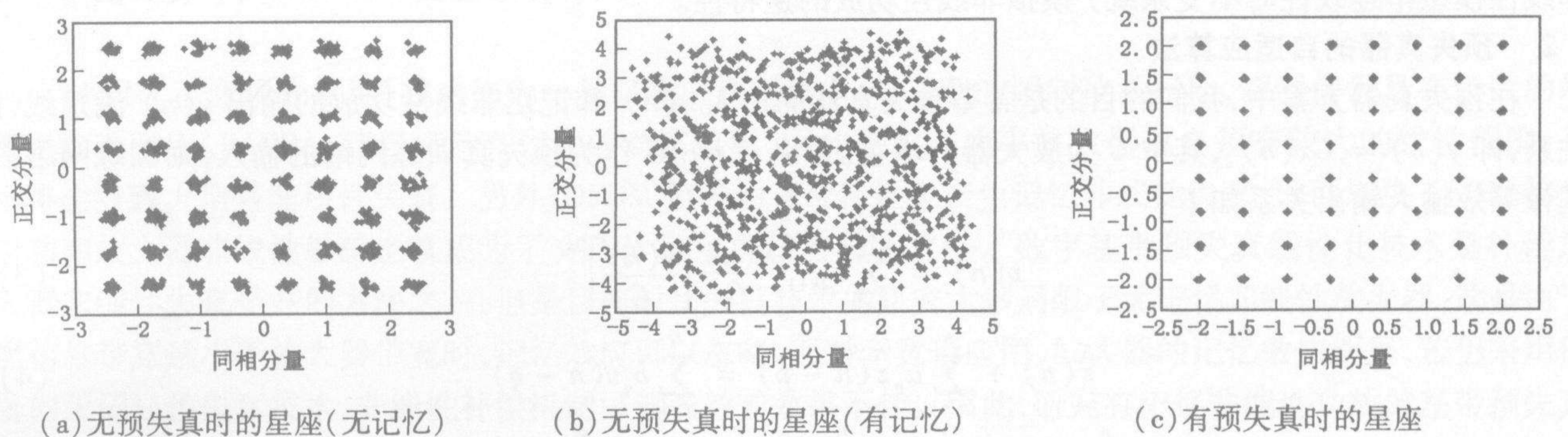


图 1 预失真前后功率放大器输出信号星座

图 2 显示了预失真前后功率放大器输出信号功率谱改善情况,明显可见 OFDM 信号经过预失真后,在输入功率回退不变的情况下,虽然放大增益与无预失真时相比有所降低,但却基本上抑制了传输信号的带外频谱扩展。若要保证相同的增益,无预失真时放大器输入功率回退需 11 dB,而带外频谱扩展依然存在,由此可见,与预失真技术相比,功放输入回退线性化技术是以牺牲功率效率为代价的。

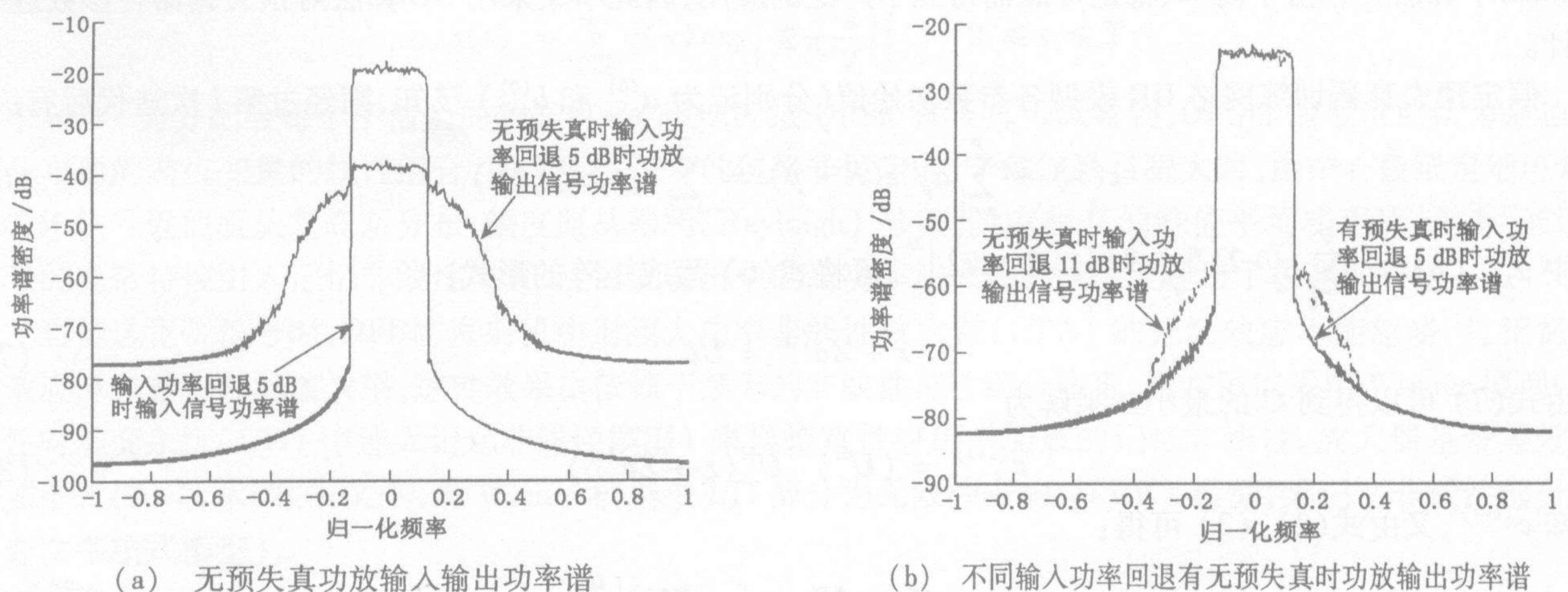


图 2 预失真前后功放输入输出信号功率谱

4 结束语

在本文中,针对 OFDM 信号的高峰值平均功率比对非线性功率放大器敏感的特点,并考虑 OFDM 的宽带特性引起的功放记忆非线性效应,提出了一种基于辨识方案的非直接学习结构的自适应基带预失真技术,给出了自适应算法。仿真结果表明,该方案能有效抑制带外频谱扩散,减小带内失真,实现有记忆非线性大功率放大器的自适应预失真。

参考文献:

- [1] Tong Wang, Jacek Ilow. Compensation of Nonlinear Distortions with Memory Effects in OFDM Transmitters[A]. Global Telecommunications Conference, 2004. GLOBECOM04. IEEE. [C]. 2004, 2398 - 2403.
- [2] Eun C, Powers E J. A New Volterra Predistorter Based on the Indirect Learning Architecture[J]. IEEE Trans. Signal Processing, 1997, 45(1): 223 - 227.
- [3] Eskinat E, Johnson S H, Luyben W L. Use of Hammerstein Models in Identification of Nonlinear Systems[J]. AIChE J, 1991, 37(2): 255 - 267.
- [4] Narendra K S, Gallmam P G. An Iterative Method for the Identification of the Nonlinear Systems Using the Hammerstein Model [J]. IEEE Trans. on Automatic Control, 1966, 11(6): 546 - 550.

(编辑:田新华)

Base - band Pre - distortion Techniques of Nonlinear Power Amplifiers with Memory in OFDM Systems

TAN Shui, WANG Guang - ming, LIANG Jian - gang

(The Missile Institute, Air Force Engineering University, Sanyuan, Shaanxi 713800, China)

Abstract: The OFDM system is characterized by the Gaussian - like signal behavior with a relatively high peak - to - average power ratio (PAPR). As a result, the performance of OFDM system is very sensitive to nonlinear distortions, which arise mainly from the high power amplifier (HPA). In addition, the wideband characteristics of transmitted signals cause the nonlinear distortions to be frequency - dependent. This paper proposes an identification - based adaptive pre - distortion scheme, which is constructed by using the indirect learning architecture, to compensate nonlinearity of the HPA with memory effects. Simulation results show that the proposed adaptive pre - distortion scheme can effectively suppress spectral re - growth and reduce in - band distortion for HPA with memory.

Key words: OFDM; pre - distortion; nonlinear distortion with memory; indirect learning architecture