

文献引用格式:袁红林,刘成云,包志华.一种正交频分复用系统的非线性补偿技术[J].电视技术,2016,40(1):87-90.

YUAN H L, LIU C Y, BAO Z H. Nonlinearity compensation technology for OFDM systems[J]. Video engineering, 2016, 40(1):87-90.

中图分类号:TN92 文献标志码:A DOI:10.16280/j.videoe.2016.01.017

# 一种正交频分复用系统的非线性补偿技术

袁红林<sup>1,2</sup>, 刘成云<sup>1</sup>, 包志华<sup>1</sup>

(1. 南通大学 电子信息学院, 江苏 南通 226019; 2. 肯特大学, 肯特 CT27NZ)

**摘要:**针对正交频分复用(OFDM)系统在功率放大器(PA)非线性较强时的性能问题,基于一种无线设备非线性与无线信道的联合估计技术,提出了一种基于训练序列的 OFDM 非线性信道估计与补偿技术。首先基于最小二乘(LS)算法进行发射机非线性与无线信道单位脉冲响应的联合估计,然后依次进行无线信道与发射机非线性的补偿。仿真结果显示,提出方法可逼近不考虑 PA 非线性时 OFDM 无线通信系统的完美均衡理论解析值。

**关键词:**OFDM; 非线性信道; 信道估计; 信道补偿; LS

## Nonlinearity compensation technology for OFDM systems

YUAN Honglin<sup>1,2</sup>, LIU Chengyun<sup>1</sup>, BAO Zhihua<sup>1</sup>

(1. School of Electronics and Information, Nantong University, Jiangsu Nantong 226019, China;

2. University of Kent, Kent CT27NZ, UK)

**Abstract:** Aiming at the problem of communication performance of OFDM systems when the Power Amplifier (PA) nonlinearity is strong, and based on a kind of combined estimation technology for nonlinearity of transmitters and wireless channels, a nonlinear channel estimation and equalization technique of OFDM system is proposed based on training sequences. Firstly, the transmitter nonlinearity and unit impulse response of wireless channel are estimated with least squares (LS) algorithm, then the compensation of wireless channel and transmitter nonlinearity are done successively. Simulation results show that the proposed method may approach the result of OFDM wireless communication systems without nonlinearity under the perfect compensation of wireless channel.

**Key words:** OFDM; nonlinear channel; channel estimation; channel compensation; LS

由于具有高带宽效率、高传输容量与抗多径衰落等优点,正交频分复用(OFDM)技术已广泛应用于数字音频广播(DAB)、数字视频广播(DVB)、数字用户线路(DSL)以及电视频带的无线局域网(IEEE802.22)与第五代(5G)移动通信的物理层传输。OFDM系统中,信道估计对于干扰压制、相干检测与解码都具有非常重要的作用。一般的OFDM信道估计技术把无线设备的发射机部分近似为线性系统;然而,由于功率放大器(PA)等器件的存在,实际的无线设备发射机具有非线性。当这种非线性较强时,会损伤OFDM系统子载波

的正交性,产生子载波干扰(ICI)与符号间干扰(ISI),使OFDM系统的通信性能下降。

文献[1]提出了一种基于最小二乘(LS)支持向量的OFDM非线性信道估计算法,仿真结果比传统算法有了一定的性能改善;文献[2]使用Hammerstein模型和维纳模型代替Volterra级数模型来模拟非线性结构以降低运算复杂度,提出了一种非线性信道传输系统模型及3种均衡算法;文献[3]提出了一种应用于MIMO信道的非线性估计与补偿方法;文献[4]提出了一种基于维纳模型的非线性信道接收端均衡方案,该

基金项目:国家自然科学基金项目(61371111);交通运输部应用基础研究项目(2012-319-813-270);江苏政府留学奖学金(2012)

发明专利:基于射频指纹的无线发射机的识别方法(2011100742224);一种从BPSK信号中获取稳健RFF的方法(201210577844.3)

方案把非线性信道建模为 Hammerstein 系统,在接收端采用 LS 估计算法分别进行线性与非线性部分的均衡,取得了一定的效果。

与已有相关文献不同,本文提出了一种新的 OFDM 系统非线性信道估计与补偿技术。提出技术首先基于 OFDM 帧训练序列的先验导频符号,进行无线发射机非线性与无线信道的联合估计;然后再依次分别进行无线信道的频域补偿与无线发射机非线性的时

域补偿。仿真结果显示,基于提出技术的非线性 OFDM 系统性能可逼近不考虑非线性 PA 的 OFDM 系统进行完美均衡时的通信性能。

## 1 系统模型

提出方法所采用 OFDM 系统的基带等效模型如图 1 所示。

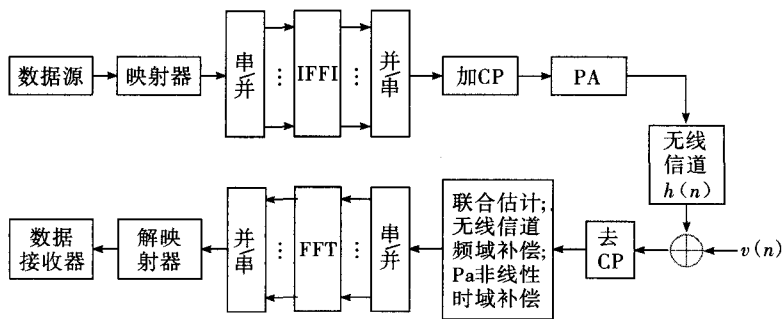


图1 系统基带等效模型

图1中,发送数据源符号经映射器、串/并变换、IFFT后变为时域序列,加循环前缀(CP)后经功率放大器(PA)发送到无线信道,再经加性高斯白噪声(AWGN)  $v(n)$  后为接收序列  $r(n)$ 。

在传统的 OFDM 均衡方案中,  $r(n)$  直接经去 CP、串/并变换、FFT、信道估计、信道均衡、并/串变换、解映射模块后到达数据接收器。

本文提出的方法中,接收信号  $r(n)$  首先经参量联合估计后,得到无线信道单位脉冲响应与 PA 非线性模型系数的估计;接收信号  $r(n)$  采用联合估计得到的两参量,经无线信道频域补偿、PA 非线性时域补偿后再送至其他模块。

## 2 理论推导

设多径衰落信道的单位脉冲响应为  $h(n)$ , 则有如下卷积关系

$$r[n] = x[n] * h[n] + v[n] \quad (1)$$

假设 PA 为泰勒级数模型,则

$$x[n] = \sum_{p=1}^P b_p d[n] |d[n]|^{p-1} \quad (2)$$

式中:  $p=1, 2, \dots, P$ ,  $P$  为模型的非线性阶数,  $b_p$  是相应的多项式因子,并假设  $b_1=1$ 。式(2)可写成矢量形式

$$x[n] = \mathbf{d}_p^T(n) \mathbf{b}_p \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{d}_p(n)$  是由  $p$  枚举而成的  $d[n] |d[n]|^{p-1}$  构成的列矢量;  $\mathbf{b}_p$  是由相应  $b_p$  构成的列矢量。

设无线信道单位脉冲响应长度为  $M$ ,  $\mathbf{h} = [h(0), h(1), \dots, h(M-1)]^T$ , 把式(3)代入式(1),可得

$$r(n) = \mathbf{d}_{p,n}^T (\mathbf{h} \otimes \mathbf{b}_p) + v(n) \quad (4)$$

式中:  $\mathbf{d}_{p,n}^T = [\mathbf{d}_p^T(n), \mathbf{d}_p^T(n-1), \dots, \mathbf{d}_p^T(n-M+1)]$  为 OFDM 符号样值  $d(n)$  根据非线性模型构建的卷积矢量;  $\mathbf{I}_M$  为  $M \times M$  单位阵;  $\otimes$  为 Kronecker 积,  $\mathbf{h} \otimes \mathbf{b}_p = [b_1 h(0), b_2 h(0), \dots, b_p h(0), \dots, b_1 h(M-1), b_2 h(M-1), \dots, b_p h(M-1)]^T$ 。

假设  $d(n)$  是先验的导频符号,因此  $\mathbf{d}_{p,n}^T$  已知。根据接收序列  $r(n)$  与式(4),采用 LS 得到  $\mathbf{h} \otimes \mathbf{b}_p$  的估计。根据  $\mathbf{h} \otimes \mathbf{b}_p$ , 可得到 PA 的模型系数估计,表示为  $\hat{\mathbf{b}}_p = [1, \hat{b}_1, \dots, \hat{b}_p]^T$ 。

根据得到的 PA 模型系数估计  $\hat{\mathbf{b}}_p$  以及式(2),可得到经过 PA 后的实际发送符号估计  $\hat{x}[n]$ ;进而根据式(4)中的  $r(n) = [\hat{x}(n), \hat{x}(n-1), \dots, \hat{x}(n-M+1)] \mathbf{h} + v(n)$ , 再进行一次 LS 算法,得到无线信道单位脉冲响应的估计,表示为  $\hat{\mathbf{h}}$ 。

至此,通过两次 LS 算法,根据接收信号、PA 模型与先验导频序列,实现了 PA 模型非线性系数  $\hat{\mathbf{b}}_p$  与无线信道单位脉冲响应  $\hat{\mathbf{h}}$  的联合估计。

接着,采用无线信道单位脉冲响应估计  $\hat{\mathbf{h}}$  进行无线信道的频域补偿;采用 PA 模型非线性系数估计  $\hat{\mathbf{b}}_p$  进行 PA 非线性的时域补偿。

提出的基于先验导频的 OFDM 系统非线性信道估

计与均衡技术的步骤可总结为图2所示。

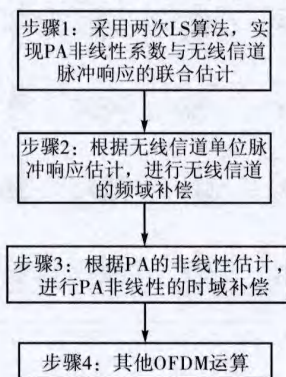


图2 基于先验导频的 OFDM 系统非线性信道估计与均衡技术

假设接收序列  $r(n)$  的离散时间傅里叶变换(DTFT)样值构成矢量为  $\mathbf{R}(w)$ ,  $\hat{\mathbf{h}}$  的 DTFT 样值构成矢量为  $\hat{\mathbf{H}}(w)$ , 则图2中步骤2对无线信道进行频域补偿后可描述为

$$\hat{\mathbf{X}}(w) = \frac{\mathbf{R}(w)}{\hat{\mathbf{H}}(w)} \quad (5)$$

根据式(2), 可得图2中步骤3进行PA非线性时域补偿后结果

$$\hat{d}[n] = \text{IDTFT}\{\hat{\mathbf{X}}(w)\} - \sum_{p=2} \hat{b}_p d[n] |d[n]|^{p-1} \quad (6)$$

其中:  $\hat{b}_p$  为步骤1得到的PA模型非线性系数估计  $\hat{\mathbf{b}}_p$  的矢量元素。

### 3 仿真实验

假设 OFDM 系统采用图3所示块状类型的导频排列结构<sup>[5]</sup>。

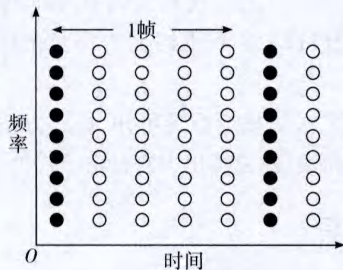


图3 块状类型的导频结构

仿真实验分两部分, 首先进行PA非线性与无线信道联合估计与补偿的样本仿真, 然后进行基于 Monte Carlo 的系统误比特率(BER)性能仿真。

样本仿真时, OFDM 符号随机生成。每个 OFDM 符号长 1 152, 其中循环前缀长 128, FFT 长 1 024。基

带 OFDM 频域数据符号采用 16QAM 调制。PA 阶数为 7, 无线信道径数为 3, PA 非线性因子与一次无线信道单位脉冲响应的实际值见表1。

表1 PA 与无线信道参数

PA 因子	实际值	信道	实际值
$b_{1,0}$	1.00	$h(0)$	$0.7 - 0.3i$
$b_{3,0}$	$-0.20 + 0.01i$	$h(1)$	$0.3 + 0.2i$
$b_{5,0}$	$0.10 + 0.05i$	$h(2)$	$0.1 - 0.05i$
$b_{7,0}$	$0.12 - 0.20i$	—	—

PA 的基本放大倍数为 15, 表1中PA的多项式因子采用基本放大倍数进行了归一化。PA 的输入与输出符号对比见图4与图5。其中, PA 输入为 OFDM 时域符号。

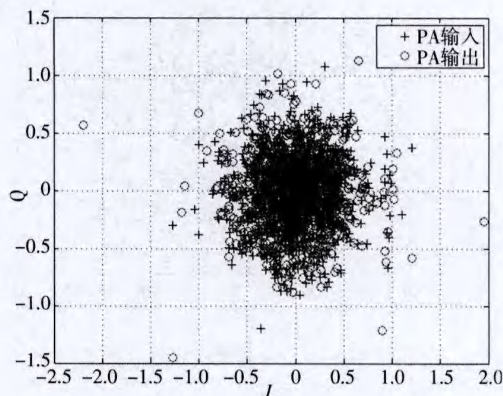


图4 PA 的输入与输出对比图

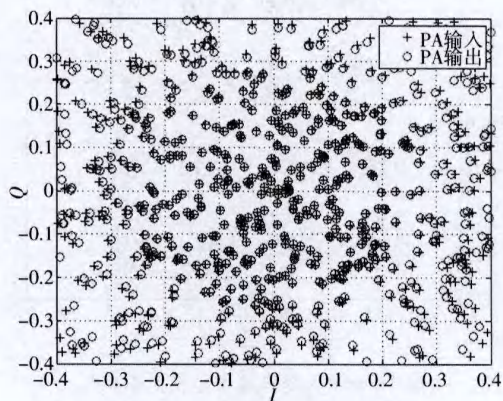


图5 PA 的输入与输出局部放大图

图5是图4的局部放大。由图5可知, 低幅值符号基本没有非线性效应, 而高幅值符号经PA放大后发生了失真。

首先基于LS算法, 进行PA非线性因子与无线信道单位脉冲响应的联合估计。当  $SNR = 20$  dB 时, PA



的非线性因子与相应无线信道脉冲响应的估计样本见表 2。

表 2 PA 与无线信道的估计参数

PA 因子	估计值	信道	估计值
$b_{1,0}$	1.00	$h(0)$	$0.70 - 0.29i$
$b_{3,0}$	$-0.20 + 0.01i$	$h(1)$	$0.30 + 0.20i$
$b_{5,0}$	$0.10 + 0.06i$	$h(2)$	$0.10 - 0.05i$
$b_{7,0}$	$0.12 - 0.21i$	—	—

接着基于表 2 中无线信道的估计参量,根据式(5)对接收信号进行频域补偿,频域补偿前后的符号星座如图 6 与图 7 所示。

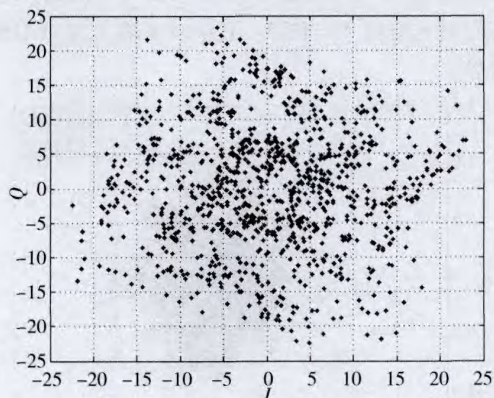


图 6 频域补偿前基带接收符号星座

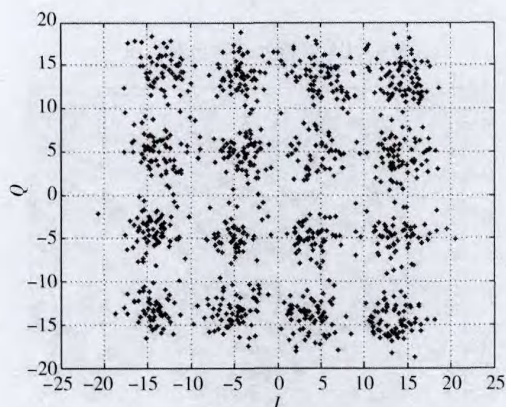


图 7 频域补偿后基带接收符号星座

然后根据表 2 中 PA 非线性因子的估计参量,根据式(6)进行时域非线性补偿,时域补偿后的基带接收符号星座如图 8 所示。

由图 8 可知,经频域补偿与时域补偿后,接收基带符号在 20 dB 信噪比时易于进行后续的数字解映射等处理。

BER 性能的 Monte Carlo 仿真时,无线信道设为瑞

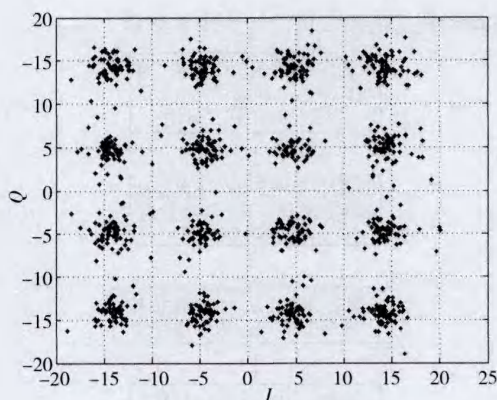


图 8 时域补偿后基带接收符号星座

利衰落信道, Monte Carlo 仿真得到的不同 SNR 下的 BER 性能如图 9 所示。

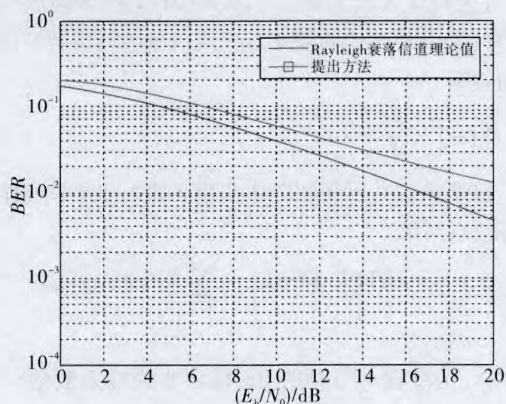


图 9 OFDM 系统的误比特性能

图 9 中的“Rayleigh 衰落信道理论值”为 16-QAM 信号在瑞利衰落信道下的 BER 解析理论曲线,即在发射机无非线性情况下进行完美无线信道均衡时的 BER 性能。由图 9 可知,在本仿真实例中,相同条件下得到的 BER 性能逼近无非线性时完美均衡条件下的理论解析曲线。

由提出方法的理论推导可知,提出方法大大增加了算法的复杂度,这是提出方法付出的代价。

## 4 结束语

本文提出了一种基于无线发射机非线性与无线信道联合估计的 OFDM 系统非线性信道估计与补偿技术。理论推导与原码仿真结果显示,提出技术具有有效克服发射机非线性的潜力,可集成到相关 OFDM 宽带应用中。如果在系统中增加信源与信道编码,可进一步提高系统性能,这是下一步的研究工作。

(下转第 94 页)



表1 ONU光网络单元性能测试结果

性能测试项	测试指标要求	实测结果
吞吐量/ (Mbit · s <sup>-1</sup> )	上行	>900
	下行	>950
过载丢包率/%	上行	<10
	下行	<5
包转发延迟/ms	上行	<1.5
	下行	<0.5
背靠背/kbyte	上行缓存	≥128
	下行缓存	≥128

测试结果表明,本文研制的ONU光网络单元产品可以与前端OLT设备正常注册和通信,各项功能正常,性能主要测试项指标满足《中国电信EPON测试方案》中的性能测试指标要求,满足产品应用和推广需求。

#### 4 结束语

本文设计了一种基于CS8032主芯片的低成本4口百兆ONU光网络单元产品,介绍了ONU光网络单元的硬件设计方案,对处理器子系统、以太网交换系统,EPON接口和外围电路设计分别进行了详细介绍,对ONU运行的软件系统也进行了阐述,最终搭建测试环境,对研制的ONU产品的主要功能性能进行测试,

测试结果表明,研制的低成本ONU光网络单元产品功能性能稳定可靠,满足产品应用需求。本文设计的ONU光网络单元同时具有一定成本优势,方案所属产品已经在某地广电系统批量出货,市场反响较好。

#### 参考文献:

- [1] 余宏博,孙运龙,韩一石.基于EPON的小区三网融合方案实现[J].电视技术,2013,37(S1):70-73.
- [2] 胡元兵,刘海,刘德明. EPON系统中的ONU的设计[J]. 电子设计应用,2006(2):85-87.
- [3] 朱雁程,黄俊,王建勇. 基于ARM的EPON体系中ONU硬件设计[J]. 光通信技术,2009(4):9-11.
- [4] 章凤麟,林如俭,张俊杰. Turbo EPON ONU硬件系统的设计[J]. 电视技术,2009,33(9):74-76.
- [5] 吴海生,陈瑜,倪振华. 用电信息采集专用低功耗ONU的设计与实现[J]. 光通信技术,2013(7):24-26.
- [6] 陈学卿,高凡. EPON系统光收发电路设计[J]. 电视技术,2014,38(1):61-65.

#### 作者简介:

张望远(1984—),硕士,工程师,主要进行机顶盒和宽带接入类产品开发。

责任编辑:许盈

收稿日期:2015-06-01

(上接第90页)

#### 致谢:

感谢已毕业硕士研究生江立伟对文中Kronecker积推导与非线性估计实验相关工作的贡献。

#### 参考文献:

- [1] 缪科,张太镒,孙建成,等. 正交频分复用系统非线性信道估计算法[J]. 西安交通大学学报,2005(6):637-640.
- [2] 刘顺兰,蒋树南. 非线性信道的均衡算法研究[J]. 电子学报,2010(10):2219-2223.
- [3] LIU M W, DOHERTY J F. Frequency-selective multiple-input multiple-output channel estimation with transmit-nonlinearities[J]. Signal processing, IET, 2009, 3(6): 467-475.

- [4] 宋玮薇,杨守义,齐林. 基于维纳模型的非线性信道接收端均衡方案[J]. 电视技术,2012,36(5):83-85.

- [5] 赵勇洙. MIMO-OFDM无线通信技术及MATLAB实现[M]. 北京:电子工业出版社,2013.

#### 作者简介:

袁红林(1971—),博士,副教授,研究方向为无线通信系统与信息处理;

刘成云(1989—),硕士生,研究方向为无线通信系统;

包志华(1955—),教授,研究方向为通信与信息系统、认知无线电、射频/微波电路等。

责任编辑:许盈

收稿日期:2015-11-05