

学校编码: 10384

分类号\_\_\_\_密级\_\_\_\_

学号: 22420051302411

UDC\_\_\_\_\_

廈門大學

碩 士 學 位 論 文

WCDMA 数字直放站数字中数字预失真研究及其  
FPGA 实现

The Research and Implementation of Digital Pre-distortion  
On WCDMA Repeater

傅佳晨

指导教师姓名: 陈辉煌 教授  
石江宏 副教授

专 业 名 称: 通信与信息系统

论文提交日期: 2008 年 4 月

论文答辩时间: 2008 年 5 月

学位授予日期: 2008 年 月

答辩委员会主席: \_\_\_\_\_

评 阅 人: \_\_\_\_\_

2008 年 月

厦门大学博硕士学位论文摘要库

# 厦门大学学位论文原创性声明

兹提交的学位论文，是本人在导师指导下独立完成的研究成果。本人在论文写作中参考的其他个人或集体的研究成果，均在文中以明确方式标明。本人依法享有和承担由此论文产生的权利和责任。

声明人（签名）：

年 月 日

## 厦门大学学位论文著作权使用声明

本人完全了解厦门大学有关保留、使用学位论文的规定。厦门大学有权保留并向国家主管部门或其指定机构送交论文的纸质版和电子版，有权将学位论文用于非赢利目的的少量复制并允许论文进入学校图书馆被查阅，有权将学位论文的内容编入有关数据库进行检索，有权将学位论文的标题和摘要汇编出版。保密的学位论文在解密后适用本规定。

本学位论文属于

1. 保密 ( )，在年解密后适用本授权书。
2. 不保密 ( )

(请在以上相应括号内打“√”)

作者签名：                    日期：          年          月          日

导师签名：                    日期：          年          月          日

## 摘要

现代社会对各种无线通信业务的需求迅猛增长,这就要求无线通信在具有较高传输质量的同时,还必须具有较大的传输容量。这种需求要求在无线通信中必须采用效率较高的线性调制方式,以提高有限频带带宽的数据速率和频谱利用率,而效率较高的调制方式通常会对发端发射机的线性要求较高,这就使功率放大器线性化技术成为下一代无线通信系统的关键技术之一。

在本文中,研究了前人所提出的各种功放线性化技术,如功率回退法、正负反馈法、预失真和非线性器件法等等,针对功率放大器对信号的失真放大问题进行研究,对比和研究了目前广泛流行的自适应数字预失真算法。在一般的自适应数字预失真算法中,主要有两类:无记忆非线性预失真和有记忆非线性预失真。无记忆非线性预失真主要是通过比较功率放大器的反馈信号和已知输入信号的幅度和相位的误差来估计预失真器的各种修正参数。而有记忆非线性预失真主要是综合考虑功率放大器非线性和记忆性对信号的污染,需要同时分析信号的当前状态和历史状态。在对比完两种数字预失真算法之后,文章着重分析了有记忆预失真算法,选择了其中的多项式预失真算法进行了具体分析推演,并通过软件无线电的方法将数字信号处理与 FPGA 结合起来,在内嵌了 System Generator 软件的 Matlab/Simulink 上对该算法进行仿真分析,证明了这个算法的性能和有效性。

本文另外一个最重要的创新点在于,在 FPGA 设计上,使用了系统级设计的思路,与 Xilinx 公司提供的软件能够很好的配合,在完成仿真后能够直接将代码转换成 FPGA 的网表文件或者硬件描述语言,大大简化了开发过程,缩短了系统的开发周期。

**关键词:** 数字预失真, FPGA, 软件无线电

厦门大学博硕士论文摘要库

## Abstract

In modern society, the increasing demand for wireless communication services requires not only better transmission quality, but also larger transmission capacity. As a result, more efficient linear modulation methods have to be applied in the wireless communication to improve the data rate and spectrum utilization in the limited bandwidth band situation. However, more efficient modulation accordingly requires higher linear transmitter, which makes the linearization of power amplifiers one of the key technologies in the next generation wireless communication system.

On the basis of some typical linear amplifier technologies proposed by predecessors, such as positive and negative feedback, non-linear device technologies, this thesis carries out a series of researches on the signal distortion issue of power amplifier, and also makes a comparison between several adaptive digital pre-distortion algorithms which are widely adopted in other studies. There are generally two adaptive digital pre-distortion algorithms, one is memoryless nonlinear pre-distortion and the other is memory nonlinear pre-distortion. The former one estimates various modificatory parameters of pre-distortion by comparing the amplitude and phase of feedback signals with input signals. The latter one needs to analyze current and historical status simultaneously and take the signal destroy caused by non-linearization and memory of power amplifier into consideration as well. After contrasting the two methods, this thesis focus on the analysis of the memory pre-distortion, makes a specific analysis and deduction with the polynomial pre-distortion algorithm. By means of the combination of digital signal process and FPGA, the algorithmic simulation and analysis are carried out in Matlab/Simulink environment embedded with system generator, the result proves that the performance and effectiveness of this algorithm are excellent.

Another significant innovation is that the design of FPGA makes use of the idea of systematic design and is able to directly convert the codes into FPGA net list files or hardware description language once the simulation is completed, which greatly simplifies the development process and shortens the development cycle of the system.

**keywords:** Digital pre-distortion, FPGA, sofradio

厦门大学博硕士论文摘要库



## 目录

摘要.....	1
ABSTRACT.....	7
目录.....	9
CONTENTS.....	11
1.绪论.....	1
1.1. 课题研究的背景和意义.....	1
1.2. 国内外发展的现状和态势.....	1
1.2.1. 直放站的发展现状和态势.....	1
1.2.2. 预失真线性化技术的发展现状和态势.....	3
1.3. 本文的工作与结构.....	4
2.功率放大器的主要参数和线性化分析.....	6
2.1. 功率放大器的特点及其分类.....	6
2.1.1. 甲类功率放大器.....	6
2.1.2. 乙类功率放大器.....	6
2.1.3. 甲乙类功率放大器.....	7
2.1.4. 其他新型功率放大器.....	7
2.2. 功率放大器的主要参数.....	7
2.2.1. 输出功率.....	7
2.2.2. 功率效率.....	7
2.2.3. 电压驻波比 (VSWR).....	7
2.2.4. 邻道功率比 (ACPR).....	8
2.2.5. 工作频率范围 (Operating Frequency).....	8
2.2.6. AM-AM (AM-PM) 特性.....	8
2.2.7. 互调特性.....	9
2.2.8. 功率放大器非线性对通信系统的影响.....	12
2.3. 功率放大器的线性化指标.....	12
2.3.1. 概述.....	12
2.3.2. 1dB 压缩点 (P1dB).....	12
2.3.3. PAPR (Peak to Average Power Ratio).....	13
2.4. 功率放大器的线性化方法.....	14
2.4.1. 前馈线性化技术.....	14
2.4.2. 负反馈法.....	15
2.4.3. 笛卡尔反馈技术.....	16
2.4.4. LINC 技术 (Linear Amplifier with Nonlinear Components).....	17
2.4.5. 包络消除恢复(EER)技术.....	18
2.4.6. Doherty 技术.....	18

2.4.7. 预失真技术[27] .....	19
<b>3.数字预失真算法分析 .....</b>	<b>21</b>
<b>3.1. 功率放大器模型 .....</b>	<b>21</b>
3.1.1. 无记忆模型 .....	21
3.1.2. 有记忆模型 .....	26
<b>3.2. 自适应预失真算法介绍及其分析 .....</b>	<b>30</b>
3.2.1. 查找表法 (LUT 法) .....	30
3.2.2. 神经网络法 .....	34
3.2.3. 基于 Hammerstein 模型的自适应预失真算法 .....	34
3.2.4. 基于 Volterra 模型的自适应预失真算法 .....	36
3.2.5. 间接学习法 .....	39
<b>4.数字中频硬件平台设计 .....</b>	<b>42</b>
<b>4.1. 整体框图及其硬件设计 .....</b>	<b>42</b>
<b>4.2. 主要模块介绍 .....</b>	<b>44</b>
4.2.1. FPGA 模块 .....	44
4.2.2. AD/DA 模块 .....	44
4.2.3. 时钟模块 .....	46
4.2.4. 监控模块 .....	46
<b>5.算法实现及其仿真分析 .....</b>	<b>47</b>
<b>5.1. 软件无线电 .....</b>	<b>47</b>
<b>5.2. 系统化设计 .....</b>	<b>49</b>
<b>5.3. 实现工具 .....</b>	<b>50</b>
<b>5.4. 算法选择 .....</b>	<b>52</b>
<b>5.5. 算法实现方法 .....</b>	<b>53</b>
5.5.1. 基本模型及其功能模块划分 .....	53
5.5.2. 前向链路实现 .....	55
5.5.3. 反馈回路实现 .....	59
<b>5.6. 算法仿真 .....</b>	<b>62</b>
5.6.1. 仿真条件 .....	62
5.6.2. 仿真流程 .....	63
5.6.3. 仿真结果及其分析 .....	63
<b>6.总结和展望 .....</b>	<b>65</b>
<b>6.1. 本论文工作总结 .....</b>	<b>65</b>
<b>6.2. 后期工作展望 .....</b>	<b>66</b>
<b>参考文献: .....</b>	<b>67</b>
<b>致谢: .....</b>	<b>70</b>

## Contents

<b>Abstract in China</b> .....	<b>1</b>
<b>Abstract in English</b> .....	<b>7</b>
<b>Contents in China</b> .....	<b>9</b>
<b>Contents in English</b> .....	<b>11</b>
<b>Chapter1 Preface</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1. The background and meaning of the subject</b> .....	<b>1</b>
<b>1.2. Reach status</b> .....	<b>1</b>
1.2.1. The situation and status of repeaters .....	1
1.2.2. The situation and status of Digital pre-distortion .....	3
<b>1.3. The working and structure of dissertation</b> .....	<b>4</b>
<b>2.The parameters of power amplifiers and linear analysis</b> .....	<b>6</b>
<b>2.1. The Characteristics and Classification of Power Amplifiers</b> .....	<b>6</b>
2.1.1. The A class amplifiers .....	6
2.1.2. The B class amplifiers .....	6
2.1.3. The AB class amplifiers .....	7
2.1.4. another new amplifiers .....	7
<b>2.2. The main parameters of power amplifiers</b> .....	<b>7</b>
2.2.1. Output power .....	7
2.2.2. Efficiency of power amplifiers .....	7
2.2.3. Voltage standing wave ratio (VSWR) .....	7
2.2.4. Adjacent Channel Power Ratio (ACPR) .....	8
2.2.5. Operating Frequency .....	8
2.2.6. The characteristics of AM-AM (AM-PM) .....	8
2.2.7. The characteristics of Intermodulation .....	9
2.2.8. The influence of non-linear power amplifier .....	12
<b>2.3. The Linear indicators of Power Amplifiers</b> .....	<b>12</b>
2.3.1. Overview .....	12
2.3.2. The compression point on 1dB.....	12
2.3.3. PAPR (Peak to Average Power Ratio) .....	13
<b>2.4. The Linear method of Power Amplifiers</b> .....	<b>14</b>
2.4.1. The Linear Technology about Feedforward .....	14
2.4.2. Negative feedback Method.....	15
2.4.3. The Descartes Feedback Method .....	16
2.4.4. Linear Amplifier with Nonlinear Components .....	17
2.4.5. The Technology of Envelope Elimination resume (EER).....	18

2.4.6.	The technology of Doherty.....	18
2.4.7.	The technology of Pre-distortion.....	19
<b>3.</b>	<b>Algorithms Analysis of Digital Pre-distortion .....</b>	<b>21</b>
<b>3.1.</b>	<b>The model of Power Amplifiers.....</b>	<b>21</b>
3.1.1.	The model of memoryless nonlinear systems .....	21
3.1.2.	The model of memory nonlinear systems .....	26
<b>3.2.</b>	<b>The medel description and analysis of Adaptive pre-distortion .....</b>	<b>30</b>
3.2.1.	Look-up Table Method(LUT).....	30
3.2.2.	Neural Networks method.....	34
3.2.3.	The Adaptive pre-distortion base on the Hammerstein model.....	34
3.2.4.	The Adaptive pre-distortion base on the Volterra model.....	36
3.2.5.	Indirect learning .....	39
<b>4.</b>	<b>Hardware platform of digital IF.....</b>	<b>42</b>
<b>4.1.</b>	<b>Framework design and hardware design.....</b>	<b>42</b>
<b>4.2.</b>	<b>Main module Introduction.....</b>	<b>44</b>
4.2.1.	FPGA module .....	44
4.2.2.	AD/DA module.....	44
4.2.3.	Clock module .....	46
4.2.4.	Monitoring module.....	46
<b>5.</b>	<b>Algorithm Implementation and simulation analysis .....</b>	<b>47</b>
<b>5.1.</b>	<b>Software radio.....</b>	<b>47</b>
<b>5.2.</b>	<b>Systematic Design.....</b>	<b>49</b>
<b>5.3.</b>	<b>Implementation tools.....</b>	<b>50</b>
<b>5.4.</b>	<b>Algorithm choice.....</b>	<b>52</b>
<b>5.5.</b>	<b>Algorithm Implementation.....</b>	<b>53</b>
5.5.1.	The model and Functional module division .....	53
5.5.2.	The implementation of Forward Link .....	55
5.5.3.	The implementation of Feedback Loop.....	59
<b>5.6.</b>	<b>Algorithm simulation .....</b>	<b>62</b>
5.6.1.	Simulation conditions.....	62
5.6.2.	Simulation Process .....	63
5.6.3.	The simulation results and analysis.....	63
<b>6.</b>	<b>Conclusion and prospect .....</b>	<b>65</b>
<b>6.1.</b>	<b>Summary of this dessertation.....</b>	<b>65</b>
<b>6.2.</b>	<b>Future work .....</b>	<b>66</b>
<b>Reference:</b>	<b>.....</b>	<b>67</b>
<b>ACKNOWLEDGEMENT:</b>	<b>.....</b>	<b>70</b>

## 1. 绪论

### 1.1. 课题研究的背景和意义

一直以来频谱资源都是非常稀缺的资源，因此，无线通信也将更为有效的利用这一资源作为研究的发展方向。

一般来说，传统的 GSM 系统是采用 GMSK 调制方式，这是一种恒包络调制，其主要的技术指标对功放的非线性失真不敏感。随着无线宽带技术的不断发展，数字通信技术和多载波技术得到了广泛的应用，而这些系统对信道的非线性失真具有很严格的要求。

在现代的数字微波通信系统中，为了扩大通信容量，更加有效的利用频谱资源，通常都要使用频谱效率较高的调制方式。例如：QAM 调制，一个 16QAM 调制能够提供大约 3bit/Hz/s 的频谱效率。在 QAM 系统中，信号传输的同时依赖于载波的幅度和相位，这就使得这样的调制方式对信道的非线性特性非常的敏感。

要解决这样的非线性问题，有一种方法是采用功率回退的工作原理，通过使功率放大器工作在离饱和点回退 10--15dB 的地方。但这种方法会导致功率放大器的使用效率较低，而且为了回退后的功率能够达到使用要求不得不使用较大功率的功率放大器，这也必然导致能量的大量浪费和成本的增加<sup>[1]</sup>。

另外一种有效的方法就是采用预失真技术<sup>[2]--[5]</sup>，通过对输入信号的预畸变补偿功率放大器的振幅和相位信息，从而达到线性化的目的。而预失真的非线性特性可以用一个查找表或者多项式来表示，因为功率放大器的特性会随着时间，温度，信道状况，器件老化情况等因素而改变，所以在预失真器的反馈回路还必须加上自适应模块，来适应这些变化。

### 1.2. 国内外发展的现状和态势

#### 1.2.1. 直放站的发展现状和态势

在 3G 网络建设中，站点数量直接决定了投资的大小，而且站点投资往往大于设备投资，所以通过广覆盖减少站点可以大幅度减少运营商的投资。作为网络覆盖的重要方式之一——宏基站+RRU，它们之间采用数字信号传输，可减少天线馈缆损耗约 3dB，10W 的 RRU 就可以达到 20W 宏基站覆盖的效果，同样的输

输出功率 RRU 与宏基站相比站点数目可减少 30%。因此，目前各大通讯厂商均投入大量的资金进行 RRU 及其嵌入式软件的研发，如中兴、华为等。

未来基站的设计理念是要满足运营商高性能、高可靠、节省 TCO、布网灵活和升级维护方便的需求。基站的总体发展趋势是更低成本、更灵活的架构、更高的性能和更高的集成度。基站产品形态将朝着满足各种复杂无线环境需求的方向发展，基带技术朝着更高性能、更高集成度的方向发展，射频技术将朝着更高效率、更高灵活性的方向发展，传输技术将朝着全 IP 方向发展。

数字直放站在国外的发展比较快，在前几年已经形成其相应的技术，已达到技术相对成熟的阶段；韩国在 2000 年初就开始研发设计数字式直放站并在 2002 年投入使用,其主要产品有数字光纤站、射频拉远单元 (RRU)。

**开放式模块化发展：**全模块化结构，使得基站配置以“搭积木”方式进行，扩容升级异常方便，同时可以快速响应运营商的需求。模块化结构使得运营商维护设备的种类大大减少，降低了运维难度，节省运维成本。而微基站向更小的方向发展；分布式基站将向更加灵活的方向发展，将成为各种复杂无线环境的主角。

**多载波技术发展：**随着数据业务的发展，系统容量需要不断增加，采用多载波技术的基站，具有更高的集成度、更低的功耗、更高的性能，仅需按照容量需求增加信道板，实现快速平滑扩容。

**高效率功放技术发展：**即将推出的 DPD+Doherty 技术功放，主要由两个 PA 模块组成,一个是均值功放，一个是峰值功放，均值 PA 总是工作在饱和状态，所以效率很高，能够节省基站日常耗电，同时降低基站整机散热要求，增强系统可靠性，减少空调的耗电量，大幅度降低维护成本。

**多场景多形态分布式基站：**在未来移动网络建设过程中，为了满足不同场景下对基站设备的要求，要求基站能体现多场景下的多形态，分布式基站就是其中一种重要发展方向。其演进路线是：第一代分布式基站是从传统的宏基站通过 CPRI 接口接到 RRU 上的；第二代分布式基站由标准的基带处理单元 BBU 和 RRU 组成，BBU 具有标准的尺寸，可以灵活地放置在任意一个标准机柜里；第三代分布式基站由 BBU 和各种系列的 RRU 组成，适用于各种场景的大、中、小功率 RRU，还可以通过 RHUB 灵活组网，满足各种应用的需求；更大功率的分布式基站，解决广覆盖和大容量问题，具备替代宏基站的能力；更小型化的分布

式基站，适应室内覆盖建网模式。

### 1.2.2. 预失真线性化技术的发展现状和态势

线性化技术自诞生以来，已用于卫星通信、蜂窝移动通信等各个领域。随着各种形式通信业务的增长，对高线性功率放大器的需求也日益迫切。目前，国内外对高功率放大器的线性化研究已成为一个热点，并有相应产品问世。美国 POWERWAVE 技术公司、AMPLIDYNE 公司、MPT 公司、Stealth 微波公司、线性器件技术公司、加拿大 AMPLI 集团、韩国电子学与通信研究所、日本三菱公司信息技术研发中心等多家单位，均有不同波段不同功率的产品问世。

早在上个世纪二十年代，贝尔实验室工作人员就发明了前馈和负反馈技术，并应用于放大器的设计，但其主要着眼点是器件本身，因此工作的频率和线性度都较低。直到上世纪七八十年代，射频功率放大器的线性化技术在无线通信技术的推动下得到飞速发展，出现了一些新的功放线性化技术，研究人员也将线性化从器件的设计扩展到系统设计。

围绕着功率放大器的线性化课题，人们已经提出了各种各样的算法，主要分为这样几类：前馈法（Feed-forward）、负反馈法（Feedback）、功率回退法（Back-Off）、非线性器件法（LINC）、预失真法（Predistortion）等。其中，功率回退法是一种简单、可靠的线性化措施，但是却限制了放大器的实际输出功率；反馈法并不适用于宽带信号；前馈法相比于反馈法，克服了延迟带来的影响，更适宜于宽带信号，但随着器件特性的变化其性能将变坏；非线性器件法是将输入信号变成恒包络信号再由放大器放大，它操作复杂且对器件特性的漂移很敏感，所以不适于要求具有自适应特性的应用；预失真法是目前用得最多的一种方法，它的基本原理很简单，就是将放大器的输入信号做一个与放大器的传输特性相反的预畸变，使得它与放大器所带来的失真相抵消。

根据预失真器在发射机中所处的位置，预失真技术可以分为射频预失真技术、中频预失真技术和基带预失真技术。根据预失真器处理信号的形式，又可以分为模拟预失真技术和数字预失真技术。其中，数字预失真技术一般有两种实现方式，基于查找表的方式和基于非线性射频功放的参数模型。射频功放的参数模型有级数模型、多项式模型等等。

在上个世纪八十年代，就有人提出了利用查找表和曲线拟合的预失真方法

<sup>[40]</sup>。1990 年, 又有人提出了用两张一维表的方法和复增益查找表法来实现预失真<sup>[40]</sup>。因此可以认为, 基于查找表的方法是目目前预失真技术的一个重要分支。

另一方面, 随着无线通信技术的发展, 对发射机系统的功率效益、线性化程度以及频谱效率等性能要求的提高, 线性化技术发展到现在, 逐渐表现出各种技术相互融合的趋势。预失真技术中也加入负反馈的思想; 预失真技术与前馈技术的结合; 最近还出现了预失真技术与 LINC 技术的结合; 随着数字信号处理技术的进步, 尤其是高速度 DSP 技术的飞速发展, 线性化技术中逐渐加入了自适应的思想, 使得功率放大器线性化系统的稳健性有了更大的提高。

### 1.3. 本文的工作与结构

本课题是厦门大学 ATR 实验室与福建省科技厅及福建省通信产业一些企业合作的, 其主要任务是解决功率放大器的非线性失真问题。具体的说就是通过软件无线电的方法, 解决 WCDMA 信号在放大的过程中, 由于功率放大器的非线性而产生的信号干扰和畸变的问题。

在课题开展过程中, 本人阅读了大量有关功率放大器线性化方面的文献资料, 重点研究了功率放大器的非线性特性, 以及几种常用的改善其非线性特性的方法, 比较其优缺点。根据该项目的技术要求, 在指导老师的悉心指导下, 拟定本课题采用的技术路线及实施方案。本文工作的特色和创新之处是:

- 完全用 FPGA 完成整个系统的主体功能。
- 在 FPGA 中完成较为复杂的矩阵运算。(如求逆, 相乘等)
- 在 FPGA 中完成浮点定点运算。
- 用软件无线电的方式完成数字预失真算法的设计和实现
- 在 FPGA 上, 采用系统化的设计方法完成设计和实现。

作者从项目开初直到项目结束, 都参与其中。此外, 先后有 5 名研究生参与该项目。作者主要完成系统的整体设计, 及其系统中数字预失真部分的设计。在综合各种数字预失真算法的基础上, 寻找到了—种有效的自适应预失真方法, 实验结果验证了其有效性和稳定性。在设计实现期间, 还得到了 Xilinx 公司和泉州几个直放站企业的大力支持。

本文的结构如下: 第一章为引言, 介绍项目背景和本文的主要内容; 第二章



Degree papers are in the "[Xiamen University Electronic Theses and Dissertations Database](#)". Full texts are available in the following ways:

1. If your library is a CALIS member libraries, please log on <http://etd.calis.edu.cn/> and submit requests online, or consult the interlibrary loan department in your library.
2. For users of non-CALIS member libraries, please mail to [etd@xmu.edu.cn](mailto:etd@xmu.edu.cn) for delivery details.

厦门大学博硕士学位论文摘要库