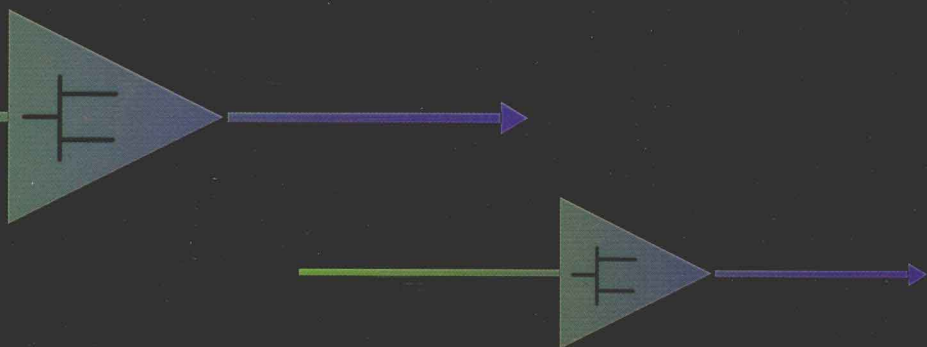


射频与微波晶体管 功率放大器工程

◆ 张玉兴 陈 会 文继国 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

射频与微波晶体管功率 放大器工程

张玉兴 陈 会 文继国 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书主要阐述射频和微波晶体管功率放大器工程设计的基本理论、方法、设计技巧和工程实现。书中给出了较多的工程设计的实例和实现时需要注意的工程方法，为电子工程师提供了几乎所有的手段，以提高设计效率，缩短设计周期。书中不仅注重功率放大器的基本理论、传统的设计方法，还涉及最新的设计理念和分析方法——异相功率放大器、功率放大器中的记忆效应。本书既侧重理论分析又重视工程实践，尤其适合从事射频、微波晶体管功率放大器设计工程师阅读。

本书的每一章都可以独立成立，如第7章、第8章和第9章，因此相关内容也可以作为有关专业的研究生教材或参考文献。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

射频与微波晶体管功率放大器工程/张玉兴，陈会，文继国编著. —北京：电子工业出版社，2013.4
ISBN 978-7-121-15461-4

I. ①射… II. ①张… ②陈… ③文… III. ①晶体管-功率放大器 IV. ①TN722.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2011) 第 259814 号

策划编辑：刘海艳

责任编辑：李蕊

印刷：三河市鑫金马印装有限公司

装订：三河市鑫金马印装有限公司

出版发行：电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编：100036

开本：787×1092 1/16 印张：39.75 字数：1017.6 千字

印次：2013 年 4 月第 1 次印刷

印数：3500 册 定价：98.00 元

凡所购买电子工业出版社的图书，如有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及购电话：(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zlt@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线：(010) 88258888。

前 言

信号与信息传输系统，不管传输媒介是空气、传输线、光纤还是波导，在传输的过程中信号都会有损耗。因此，在信号的发送端需要把被发送的信号放大到一定的电平，然后再通过媒介传送。在无线信号传输系统中，信号通过天线向空间辐射，传输距离可能从几米，几千米，几十千米到上千千米，这就是说发送端需要几瓦，几十瓦，乃至成百上千瓦的发射功率。因此，通信、雷达、定位、导航、遥测遥控、空间技术、电视广播等信号传输系统中都需要发射机。而发射机的核心就是射频和微波功率放大器。现代移动通信中的基站发射机功率为几十瓦，而手持机的功率为几百毫瓦，雷达发射机的脉冲功率高达几千瓦甚至上百千瓦。中短波、超短波，以及 VHF/UHF 的广播、电视、通信发射机的功率从几瓦到几十瓦，高至千瓦。上述系统的频率从几十万赫兹一直覆盖到微波波段。功率放大器覆盖这么宽的频带，功率范围从几百毫瓦到几十千瓦，不同的应用场合对功率放大器的指标要求、频带要求都是不一样的。各个频段的功率放大器，特别是射频段和微波波段，电路结构形式是完全不一样的。

现代移动通信技术在飞速发展，模拟通信体制逐渐退出历史舞台，数字通信体制在更新换代。所有这些变革都对射频、微波功率放大器的指标要求越来越苛刻。功率放大器如何满足现代通信系统的要求，仍是摆在人们面前的艰巨任务。新一代移动通信中的发射机，效率和线性度这两个指标被摆到了最重要的位置。为了满足这种苛刻的要求，设计出了许多新型发射机的方案，一些已经成熟，而有些仍在研发之中。

除了性能指标之外，价格因素也是必须考虑的问题。移动通信领域中的市场竞争尤其激烈，价格竞争是一个最主要的领域。功率放大器的价格是影响系统价格的最主要因素之一。因此，高指标、低价格是现代功率放大器设计者追求的目标。

射频和微波功率放大器的设计技术是一门古老的技术，但也是仍在不断更新的技术。功率放大器分成 A 类、B 类和 C 类的方法早在 20 世纪 30 年代就开始了，至今这个概念还在使用。由于移动通信新一代数字调制系统的使用，要求功率放大器具有高线性度。为了满足系统要求，老的设计方法，如效率与功率的折中、功率和线性度之间的折中等，仍在使用古老的分析方法。今天，这种方法对功率放大器的设计仍起指导作用。当然，现代功率放大器的计算机辅助设计已是必不可少的，掌握它是势在必行的。

现代通信技术的日新月异，促进了功率放大器技术的发展，尤其是功率放大器的线性化技术、功率放大器效率提高技术、兼顾功率放大器线性度和效率技术等更是纷纷出笼。例如，Doherty 技术、前馈技术、预失真技术、异相技术等。这些新技术很多已应用在现代移动通信系统中，还有一些正在发展之中。

射频与微波功率放大器的设计与实践，在我国仍是一个较薄弱的环节。笔者认为，编著一种既有原理、设计方法，又有工程实践的书是完全必要的。功率放大器，至少在今后几十年，仍是一门不能集成的电路技术，尤其是大功率放大器，其理由是众所周知的。射频和微

波电路中的分布参数、寄生参数及互相耦合的影响是不能忽略的。功率放大器电路板布板技术的好坏，在某些应用中是电路能否成功的关键。一个设计优良的功率放大器，布板不好引起失败的例子很多。因此，本书在编写的过程中，尽可能地介绍布板技术方面的经验与例子。功率放大器除了设计和布板之外，还存在很多工程问题，如元器件的选择、馈电、热设计、功率放大器保护等，这涉及很宽的电路知识。本书在这方面也做了一些介绍，但限于篇幅，不可能对每一个部分做详细介绍。

功率放大器的核心是功率晶体管，如何正确理解晶体管、正确选择晶体管、理解各类晶体管的特性往往是电路设计者的薄弱环节。本书用了将近一章的篇幅来介绍这方面的内容。特别是如何理解晶体管数据表中给出的直流参数、功能参数、极限参数，以及极限参数的测量及限制等。

射频和微波功率放大器使用的晶体管有双极晶体管（BJT）、砷化镓金属半导体场效应管（GaAs MESFET）、结型场效应管（FET）、横向扩散场效应管（LDMOS）。现在，又出现了新颖的功率晶体管——氮化镓晶体管（GaN）、InGaP、GaAs HBT 等。关于这些晶体管的选用，本书也做了一些介绍。

本书的一个最大的特点是：用很大的篇幅介绍数字通信信号调制的性质和特点，以及用于放大这样信号的功率放大器的要求是什么，使功率放大器设计工程师有更明确的目标和目的。本书中给出了很多的工程设计实例，这些实例都来源于国外的文献资料。笔者也有很多这方面的工程设计实例和实际测量数据，但限于一些因素，不便发表。

射频和微波固体功率放大器仍在不断发展之中，很多以前认为达不到的指标正在被刷新，在书中要及时反映这些变化与发展是不可能的。因此，本书的理论核心侧重于基本概念、基本原理和基本设计方法，在这基础上，再归纳出工程设计的近似方法。

功率放大器工作在大信号状态，严格的数学分析是不可能的。为了给出定量分析的结果，常常要做很多假设。假设符合实际工程情况吗？假设得到的近似满足工程设计的精度吗？这些都要一一验证，本书给出了这个过程。

本书的第 1 至 6 章由电子科技大学张玉兴教授编写，第 7 章由陈会博士编写，第 8 章由成都信息工程学院的文继国教授编写，第 9 章由吴义华博士编写，第 10 章由赵宏飞编写。本书编写的工作量很大，在编写的过程中得到了很多人的帮助。其中主要是张玉兴教授的众多研究生和成都赛英科技有限公司的技术同行（唐世容、姚宗诚、王清文、张慧英、刘涛等），作者在此表示衷心的感谢。

张玉兴

《射频与微波晶体管功率放大器工程》

读者调查表

尊敬的读者：

欢迎您参加读者调查活动,对我们的图书提出真诚的意见,您的建议将是我们创造精品的动力源泉。为方便大家,我们提供了两种填写调查表的方式:

1. 您可以登录 <http://yydz.phei.com.cn>,进入“读者调查表”栏目,下载并填好本调查表后反馈给我们。
2. 您可以填写下表后寄给我们(北京海淀区万寿路173信箱电子技术分社 邮编:100036)。

姓名: _____ 性别: 男 女 年龄: _____ 职业: _____
电话: _____ 移动电话: _____
传真: _____ E-mail: _____
邮编: _____ 通信地址: _____

1. 影响您购买本书的因素(可多选):

- 封面、封底 价格 内容简介 前言和目录 正文内容
出版物名声 作者名声 书评广告 其他 _____

2. 您对本书的满意度:

- | | | | | | |
|-------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|------------------------------|
| 从技术角度 | <input type="checkbox"/> 很满意 | <input type="checkbox"/> 比较满意 | <input type="checkbox"/> 一般 | <input type="checkbox"/> 较不满意 | <input type="checkbox"/> 不满意 |
| 从文字角度 | <input type="checkbox"/> 很满意 | <input type="checkbox"/> 比较满意 | <input type="checkbox"/> 一般 | <input type="checkbox"/> 较不满意 | <input type="checkbox"/> 不满意 |
| 从版式角度 | <input type="checkbox"/> 很满意 | <input type="checkbox"/> 比较满意 | <input type="checkbox"/> 一般 | <input type="checkbox"/> 较不满意 | <input type="checkbox"/> 不满意 |
| 从封面角度 | <input type="checkbox"/> 很满意 | <input type="checkbox"/> 比较满意 | <input type="checkbox"/> 一般 | <input type="checkbox"/> 较不满意 | <input type="checkbox"/> 不满意 |

3. 您最喜欢书中的哪篇(或章、节)? 请说明理由。

4. 您最不喜欢书中的哪篇(或章、节)? 请说明理由。

5. 您希望本书在哪些方面进行改进?

6. 您感兴趣或希望增加的图书选题有:

邮寄地址: 北京市海淀区万寿路173信箱电子技术分社 刘海艳 收 邮编: 100036
电 话: (010)88254453 E-mail: lhy@phei.com.cn

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可,复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为;歪曲、篡改、剽窃本作品的行为,均违反《中华人民共和国著作权法》,其行为人应承担相应的民事责任和行政责任,构成犯罪的,将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序,保护权利人的合法权益,我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为,本社将奖励举报有功人员,并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话:(010)88254396;(010)88258888

传 真:(010)88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址:北京市海淀区万寿路173信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编:100036

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 现代数字通信体制的特点	1
1.1.1 功率放大器在无线通信系统中的地位	1
1.1.2 功率放大器波形质量的测量	4
1.1.3 功率效率的测量	11
1.1.4 功率放大器线性化技术和效率提高技术	12
1.2 射频与微波固体功率放大器的特点	15
1.3 射频和微波功率放大器的分析方法综述	17
1.3.1 线性近似化理论	17
1.3.2 弱非线性器件的分析方法	17
1.3.3 强非线性效应下的近似分析方法	18
1.3.4 计算机辅助设计 (CAD) 和非线性器件模型	19
1.3.5 负载牵引设计方法	20
1.4 射频和微波固体功率放大器中的新颖技术	20
1.4.1 功率放大器的线性化技术	20
1.4.2 效率及线性化增强技术	20
第 2 章 射频和微波晶体管功率放大器基础	21
2.1 射频和微波功率晶体管的直流参数和功能参数	21
2.1.1 直流参数	21
2.1.2 极限参数和热特性	24
2.1.3 功率晶体管的功能特性	26
2.1.4 低功率晶体管的功能特性	28
2.1.5 线性模块的功能特性	29
2.1.6 功率模块的功能特性	30
2.2 射频和微波晶体管应用基础	31
2.2.1 低功率晶体管的选择	32
2.2.2 高功率晶体管的选择	32
2.2.3 晶体管选择时的带宽考虑	32
2.2.4 MOSFET 与双极晶体管的选择	34
2.2.5 选择功率晶体管的其他考虑因素	35
2.3 FET 和双极晶体管的参数与电路比较	36
2.3.1 晶体管类型	36

2.3.2	参数的比较	37
2.3.3	电路组态	39
2.4	影响功率放大器设计的其他因素	43
2.4.1	工作类别	43
2.4.2	调制类型	44
2.4.3	线性工作偏置的考虑	46
2.4.4	脉冲模式工作的晶体管	51
2.5	LDMOS 功率晶体管及其应用	52
2.5.1	LDMOSFET 与垂直 MOSFET 的比较	52
2.5.2	LDMOS 器件设计	53
2.5.3	LDMOS 的特性	54
2.5.4	FET 的一些近似设计考虑	57
2.5.5	LDMOS 晶体管在现代移动蜂窝技术中的应用	58
2.5.6	射频功率放大器的特性	60
2.5.7	线性度考虑	61
2.5.8	W - CDMA 功率放大器设计实例	63
2.5.9	CDMA 放大器设计和优化的电路技术	65
2.5.10	LDMOS 晶体管的模型	67
2.6	射频和微波功率放大器的附加电路	70
2.6.1	固体功率放大器的 VSWR 保护	70
2.6.2	功率放大器负载失配量的在线测试电路	72
2.6.3	输出滤波	73
2.7	宽带阻抗匹配的基本概念	79
2.7.1	宽带电路介绍	79
2.7.2	传统的 RF 变压器阻抗变换器	81
2.7.3	绞线 RF 变压器阻抗变换器	84
2.7.4	传输线 RF 变压器阻抗变换器	87
2.7.5	等延迟传输线 RF 变压器阻抗变换器	89
2.8	射频和微波功率放大器的总体设计思想	91
2.8.1	单端、平衡（并联）和推挽功率放大器	91
2.8.2	单端 RF 功率放大器设计思想	91
2.8.3	双极晶体管并联功率放大器	93
2.8.4	MOSFET 晶体管并联功率放大器	95
2.8.5	推挽功率放大器	95
2.8.6	功率晶体管的阻抗和放大器的匹配网络	97
2.8.7	功率放大器系统的级间匹配电路	101
2.8.8	单级设计实例	103

2.9	计算机辅助设计程序	112
2.9.1	概况	112
2.9.2	Motorola 阻抗匹配程序的内部	118
第3章	射频和微波功率放大器的结构技术及可靠性技术	119
3.1	RF 功率晶体管的封装类型	119
3.2	封装对发射极/源极阻抗的影响	122
3.3	射频和微波功率放大器印制电路板的布局	124
3.4	射频和微波元器件安排	128
3.4.1	高功率晶体管的安装	128
3.4.2	低功率晶体管的安装	131
3.4.3	射频功率模块的安装	131
3.5	射频和微波功率放大器的可靠性考虑	132
3.5.1	芯片温度及其对可靠性的影响	132
3.5.2	其他可靠性考虑	136
第4章	线性功率放大器的设计和功率放大器的线性化技术	139
4.1	非线性电路基本概念与定义	139
4.1.1	线性与非线性	139
4.1.2	频率的产生	141
4.1.3	非线性现象	141
4.1.4	放大器中的非线性现象	142
4.2	线性晶体管功率放大器的设计	157
4.2.1	A 类放大器和线性放大	157
4.2.2	增益匹配和功率匹配	162
4.2.3	负载牵引测量	163
4.2.4	商用负载牵引测量设备	164
4.2.5	负载线理论	165
4.2.6	封装效应和负载牵引理论	169
4.2.7	用 CAD 程序作负载牵引等功率线	171
4.2.8	A 类功率放大器设计的实际例子	171
4.2.9	总结	174
4.3	功率放大器的线性化技术	175
4.3.1	负反馈线性化技术	176
4.3.2	预失真技术	188
4.3.3	前馈技术	199
第5章	高效率射频和微波固体功率放大器设计	212
5.1	功率放大器减小导通角的波形分析	212
5.2	功率放大器输出端口	215
5.3	减小导通角工作模式分析	217
5.3.1	A 类工作条件	217

5.3.2	AB类工作条件	218
5.3.3	B类工作状态	218
5.3.4	C类工作状态	219
5.3.5	晶体管的开启(膝)电压的影响	220
5.3.6	功率转移特性和线性度	221
5.3.7	对输入驱动的要求	223
5.3.8	本节小结	226
5.4	降低导通角高效率功率放大器的匹配网络的设计	227
5.4.1	低通匹配网络	227
5.4.2	传输线网络	232
5.4.3	谐波短路	234
5.4.4	普通的MESFET晶体管	236
5.4.5	850MHz 2W B类功率放大器设计实例	237
5.4.6	π 形功率匹配网络	241
5.4.7	功率放大器中的 π 形匹配网络设计和分析	242
5.4.8	使用负载牵引法的网络设计和分析	246
5.5	射频和微波功率放大器中的过驱动和限制效应	247
5.5.1	过驱动A类功率放大器	248
5.5.2	过驱动减小导通角模式的功率放大器	251
5.5.3	正弦波的矩形化:F类和D类工作状态	254
5.5.4	实际的F类功率放大器	258
5.5.5	具有谐波短路的过驱动功率放大器	262
5.6	射频应用的开关模式放大器	263
5.6.1	简单的(射频应用)开关模式放大器	264
5.6.2	调谐开关模功率放大器	267
5.6.3	开关模D类功率放大器	268
5.6.4	开关模E类功率放大器	270
第6章	射频和微波功率放大器的电路技术	282
6.1	推挽放大器	282
6.2	平衡功率放大器	288
6.3	射频和微波功率放大器中的频率补偿和负反馈	294
6.3.1	频率补偿	294
6.3.2	负反馈	296
第7章	功率合成与分配技术	300
7.1	概述	300
7.1.1	合成概念的演变	301
7.1.2	合成的基本原理	301
7.1.3	合成的网络特性	302

7.2	功率合成器/分配器的类型	305
7.2.1	谐振和非谐振腔体合成器/分配器	306
7.2.2	非谐振的 N 路合成器	308
7.2.3	空间功率合成器	314
7.3	功率合成器/分配器的分析方法	318
7.3.1	传输线合成器的分析	319
7.3.2	平面二维功率合成结构的分析	319
7.3.3	波导和腔体合成器的分析	320
7.3.4	空间功率合成结构的分析	321
7.4	常规功率合成与分配技术	322
7.4.1	Wilkinson 功率合成器/分配器	322
7.4.2	耦合线定向耦合器	328
7.4.3	微波混合桥	333
7.4.4	同轴电缆变换器和合成器	339
7.4.5	平行耦合线(双绞线)及同轴线阻抗变换器和平衡-不平衡变换器	344
7.5	新型功率合成与分配技术	352
7.5.1	基于 DGS 结构的不等分功率合成技术	352
7.5.2	基于多层结构的小型化超宽带合成技术	355
7.5.3	任意双频段功率合成与分配技术	359
7.6	波导空间功率合成技术	362
7.6.1	概述	362
7.6.2	扩展同轴波导内空间功率合成技术	363
7.6.3	径向波导空间功率合成技术	368
7.6.4	基片集成波导空间功率合成技术	370
7.7	大功率合成技术简介	375
7.7.1	传输线的功率容量	375
7.7.2	大功率合成器的设计实例	376
7.8	小结	377
第 8 章	射频和微波功率放大器中的记忆效应和失真	378
8.1	介绍	378
8.1.1	本章的目的	378
8.1.2	线性化和记忆效应	378
8.1.3	本章的主要内容	379
8.2	电路理论和方法	381
8.2.1	电系统的分类	381
8.2.2	非线性系统中的频谱计算	386
8.2.3	无记忆非线性系统中的频谱再生	387
8.2.4	非线性效应与信号带宽的关系	389

8.2.5	非线性系统分析	390
8.2.6	小结	396
8.2.7	需记住的要点	397
8.3	射频功率放大器中的记忆效应	398
8.3.1	效率	398
8.3.2	线性化	399
8.3.3	电记忆效应	402
8.3.4	热记忆效应	404
8.3.5	幅度域效应	406
8.3.6	总结	410
8.3.7	记忆要点	411
8.4	Volterra 模型	411
8.4.1	非线性建模	411
8.4.2	非线性 $I-V$ 和 $Q-V$ 特性	414
8.4.3	共射 BJT/HBT 模型	419
8.4.4	在 BJT 共射放大器中的 IM_3	425
8.4.5	MESFET 建模及分析	433
8.4.6	小结	436
8.4.7	记忆要点	437
8.5	Volterra 模型的特性描述	438
8.5.1	拟合多项式模型	438
8.5.2	自热效应	440
8.5.3	直流 $I-V$ 特性	443
8.5.4	交流特性描述步骤	445
8.5.5	脉冲 S 参数测量	445
8.5.6	封装效应的去除	447
8.5.7	小信号参数的计算	450
8.5.8	拟合法交流测量	451
8.5.9	1W BJT 的非线性模型	453
8.5.10	1W MESFET 的非线性模型	455
8.5.11	30W LDMOS 的非线性模型	458
8.5.12	小结	460
8.5.13	记忆要点	461
8.6	仿真及测量记忆效应	462
8.6.1	仿真记忆效应	462
8.6.2	记忆效应的测量	467
8.6.3	记忆效应与线性化	471
8.6.4	小结	472

8.6.5	记忆要点	473
8.7	记忆效应的抵消	473
8.7.1	包络滤波法	474
8.7.2	阻抗优化	476
8.7.3	包络注入	481
8.7.4	小结	487
8.7.5	记忆要点	488
第9章	异相射频与微波功率放大器	489
9.1	异相微波功率放大器介绍	489
9.1.1	从历史角度来看异相放大器	489
9.1.2	异相放大理论的介绍	490
9.2	反相功率放大系统的线性性能	492
9.2.1	介绍	492
9.2.2	数字调制技术	492
9.2.3	数字数据的基带滤波	496
9.2.4	异相放大器信号分量的分离	501
9.2.5	路径不均衡及其对线性度的影响	506
9.2.6	正交调制器误差对线性度的影响	510
9.2.7	SCS 量化误差对于异相系统的影响	514
9.2.8	重构滤波器和 DSP 抽样率对线性度的影响	516
9.2.9	总结	518
9.3	异相放大器中降低路径失配的技术	518
9.3.1	简介	518
9.3.2	数据传输中路径失配误差的校正方案	526
9.3.3	宽带应用中的失配校正方法	534
9.3.4	VCO 驱动合成	535
9.4	异相功率放大器中的功率合成及效率增强技术	542
9.4.1	介绍	542
9.4.2	异相放大器中的功率合成技术	542
9.4.3	异相系统的放大器选择	545
9.4.4	利用 A、B、C 类放大器设计异相放大器	546
9.4.5	Chireix 功率合成技术	549
9.4.6	开关模式放大器 (D 类和 E 类) 的功率合成器的设计	551
9.4.7	在异相功率放大器中使用有损耗的功率合成器	558
9.4.8	输出功率的概率分布及其对效率带来的影响	559
9.4.9	异相放大器中的功率回收	561
9.5	混合型功率合成器输出的资用功率	574
9.6	任意二极管模型的回收效率和电压驻波比	574

第 10 章 通信系统中的功率放大器	576
10.1 Kahn 包络分离和恢复技术	576
10.2 包络跟踪	579
10.3 异相功率放大器	582
10.4 Doherty 功率放大器方案	586
10.5 开关模和双途径功率放大器	592
10.6 前馈线性化技术	597
10.7 预失真线性化技术	599
10.8 手持机应用的单片 CMOS 和 HBT 功率放大器	602
附录	610
附录 A Volterra 分析基础	610
附录 B 截断误差	612
附录 C 平方非线性级联时 IM_3 的公式	614
附录 D 测量系统的有关问题	620
参考文献	622

第1章 绪论

1.1 现代数字通信体制的特点

无线通信领域的革命是由一系列技术革新推动的，其中包括不断进步的通信理论、超大规模集成（VLSI）技术及射频（RF）微电子学。

在对这些系统进行低成本和低功耗设计的过程中，微波功率放大器扮演了重要的角色。因为，这些系统（如基站）需要输出数十瓦的功率，同时又要满足对线性度的苛刻标准及较高的直流功率的转换效率，而这些指标主要取决于功率放大器（简称功放）。

对手机里微波功放的要求：最多输出几瓦的功率，却只消耗很小的直流功率，而且大批量生产的卖价只有几美元。显然，这些要求对功放电路的设计和实现提出了严峻的挑战。

多年来，涌现出了许多富有创造性的方法来应对这种挑战，而射频与微波功放的线性度和效率的提高仍是活跃的研究领域。大体上，功率放大器线性化技术途径可以分成两种，即反馈和前馈。这两种方法都有着众所周知的优点和缺陷。反馈技术的稳定性很成问题，而前馈技术的匹配问题也是个瓶颈。在商用通信系统中，这两种方法都没有被很广泛地采用。

功放的第三种线性化技术被称为异相技术，这也是种历史悠久的技术，于20世纪30年代在AM调幅传输中被初次提出。它的关键思想是利用功率合成技术将来自两个非线性输入源的信号合成一路线性输出波形。如果合成得很成功，那么得到的波形会有很高的线性度。而那个产生合成器非线性输入波形的功率放大器，从直流功率的角度来看，效率可以做得很高。

尽管这种方法很有可取之处，但还是没有得到市场的广泛认可，这是因为一些不可忽视的缺点抵消了它固有的优势，特别是两个（非线性）放大器之间的匹配要求非常苛刻，而且射频和微波功率中的很大一部分被浪费在了后面的功率合成网络中。

但是，近来在此领域已有不少活跃的尝试以求解决这些问题，而下一代异相功放的趋势就是解决这些历史性的局限，并最终找到其通往商业应用之门的钥匙。本书用了一章的篇幅，详细地介绍了异相功率放大器。

1.1.1 功率放大器在无线通信系统中的地位

伴随着近几年来惨烈的竞争，无线市场的巨大成长激起了人们对于成本低廉、体型小巧的射频功率放大器的空前兴趣。人们关心射频功放的性能，是因为它对处在通话状态的移动台（MS）有着举足轻重的影响，如果它被很好地优化，将会有不小的潜在市场利益。此外，减小基站的功耗对成本的影响会很大，而功放在其中扮演了重要角色。

经典的功放设计技术常常忽略信号的特征，而将焦点放在晶体管性能和电路设计技术上。然而，随着数字无线通信系统的出现，为了使功率放大器对已调载波的性能指标“线

性度及功率效率”达到最优化的折中，因此很有必要学习一些数字调制理论。

本节将简单地回顾第一代与第二代模拟及数字无线通信，重点是强调无线标准对功放性能指标的要求。无线理论和通信理论的详细内容，请查阅参考文献。

蜂窝无线系统及其标准已在全世界范围内发展了数十年。由 AT&T 和 Motorola 公司开发的“高级移动电话系统”(AMPS)是在美国开通的第一家商用蜂窝系统，并在 1983 年向大众开放，这被称为第一代模拟通信系统(1G)。在欧洲，也出现了几套相似的 1G 蜂窝系统，包括完全接入式通信系统(TACS)、北欧移动电话(NMT)、C-450、无线移动电话系统(RTMS)及 Radiocom。日本 TACS/窄带 TACS(JTACS/NTACS)是以欧洲的 TACS 系统为基础开发出来的。典型的模拟无线系统采用频率调制(FM)方法，即用声音信息来调制载波的频率。FM 信号的包络是恒定的，这使人们可以在传输之前就高效率地将信号放大，因为功率放大器可以工作在饱和区且不破坏有效信号。这一优点以前常被用来降低直流功率输入，减小晶体管功耗，降低散热要求。表 1-1 列出了几种模拟蜂窝系统。这些系统的共同点在于它们都采用了 FM 调制技术及频分多址(FDMA)技术。

表 1-1 几种 1G 无线系统

标 准	例 1	例 2	例 3
年份	1983/1988	1985	1988/1993
上行频带 (MHz)	824~849	890~915	915~925
通道带宽 (kHz)	30/10	25	25/12.5
变接口	FDMA	FDMA	FDMA
调制	FM	FM	FM
最大发射功率 (dBm)	27.8	N/A	N/A
功放电压 (V)	3.6~6.0	3.6~6.0	3.6~6.0
典型功放静态电流 (mA)	30	30	30
典型效率 (%)	>50	>50	>50

FDMA 技术就是将可用频带 (band) 进行划分，然后把不同信道 (channel) 分配给各个用户。由于在模拟系统中采用了 FM 和 FDMA 技术，这就限制了系统的容量和用户特征，于是蜂窝设备制造商们开始采用数字调制技术和其他多址方法，这被称为 2G 系统。数字调制技术带来了更多的信道容量，更好的传输质量，更安全的语音、数字数据的通信，还可以提供其他的增值服务，而模拟调制技术和 FDMA 技术无法办到这一点。

时分多址技术是让多个用户共用一个频带，每个用户被分配一个特定的时隙。最广泛使用基于时分多址的数字蜂窝系统是 GSM 系统，于 1992 年开始商用。开发 GSM 的最初目的是让它成为泛欧洲的统一蜂窝标准，以取代已有的不兼容的模拟系统，而现在它已成为世界上使用最广泛的无线标准。GSM 采用的是 GMSK (Gaussian 最小位移键控) 调制技术，它将连续相位调制与高斯形状滤波器结合了起来。GMSK 是一种真正的频移键控 (FSK)，它改变了载波的相位，而保持其包络恒定。这种技术如同 FM 那样，允许功放放大的信号为恒包络波并工作在饱和状态，提供了高效率的放大。

在美国，电信产业协会 (TIA) 采用 IS-54 TDMA 标准作为模拟 AMPS 的升级版，旨在满足人群密集区域对于蜂窝容量的更大需求。随着部分服务的改进，以及为了对个人通信服