



Xilinx大学合作计划指定教材

# 无线通信的 MATLAB和 FPGA实现

西瑞克斯（北京）通信设备有限公司 编著



人民邮电出版社  
POSTS & TELECOM PRESS

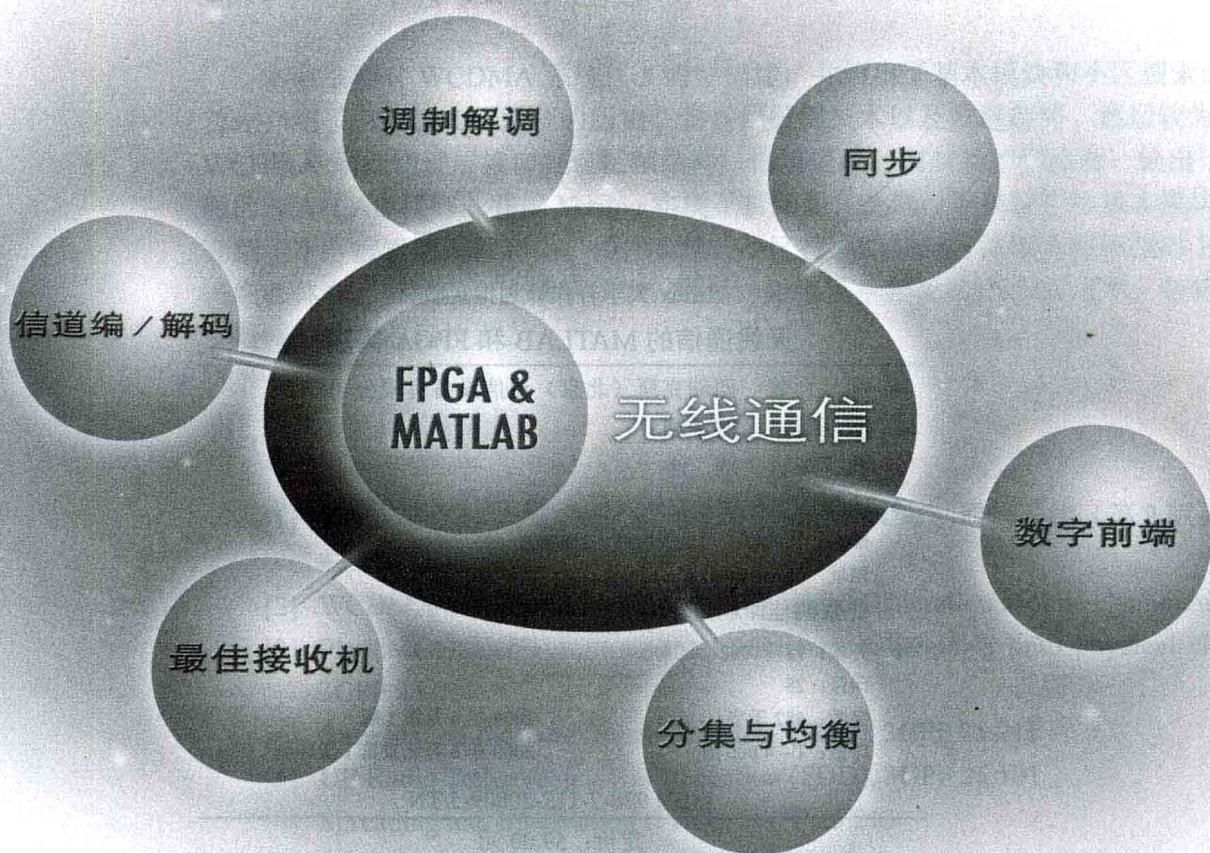




Xilinx大学合作计划指定教材

# 无线通信的 MATLAB和 FPGA实现

西瑞克斯（北京）通信设备有限公司 编著



人民邮电出版社

北京

## 图书在版编目 (C I P) 数据

无线通信的MATLAB和FPGA实现 / 西瑞克斯 (北京) 通信设备有限公司编著. —北京: 人民邮电出版社, 2009.6  
Xilinx大学合作计划指定教材  
ISBN 978-7-115-20809-5

I. 无… II. 西… III. ①无线电通信—计算机辅助计算—软件包, MATLAB—高等学校—教材②无线电通信—可编程序逻辑器件—系统设计—高等学校—教材 IV. TN92

中国版本图书馆CIP数据核字 (2009) 第059336号

## 内 容 提 要

本书以无线通信关键技术的原理及其 MATLAB 和 FPGA 实现为主题, 通过大量的 MATLAB 和 FPGA 开发实例, 较为详尽地描述了无线通信中的常用模块和原理及实现流程, 具体内容包括: 无线通信开发简介、数字处理基础、DSP 处理基础、数字调制、信道编码、最佳接收机、均衡、同步、数字前端技术以及 WCDMA 系统的关键技术。本书概念明确、思路清晰, 追求全面、系统、实用, 使读者能够在较短的时间内具备无线通信领域的 MATLAB 和 FPGA 开发能力。

本书可供从事无线通信和数字信号处理的应用工程师和工程科研人员阅读, 也可作为通信及相关专业的研究生、高年级本科生的教材或参考书。

Xilinx 大学合作计划指定教材

### 无线通信的 MATLAB 和 FPGA 实现

- 
- ◆ 编 著 西瑞克斯 (北京) 通信设备有限公司  
责任编辑 姚予疆  
执行编辑 刘 洋
  - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街 14 号  
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn  
网址 <http://www.ptpress.com.cn>  
北京鸿佳印刷厂印刷
  - ◆ 开本: 787×1092 1/16  
印张: 28  
字数: 682 千字 2009 年 6 月第 1 版  
印数: 1-4 000 册 2009 年 6 月北京第 1 次印刷

---

ISBN 978-7-115-20809-5/TN

定价: 59.00 元

读者服务热线: (010)67129264 印装质量热线: (010)67129223  
反盗版热线: (010)67171154

# 前 言

数字化、宽带化是当今无线通信发展的主流方向。当前无线通信技术发展极为迅猛，新技术层出不穷。迄今为止，国内外出版了许多有关无线通信或 FPGA 技术的图书，但综合无线通信和 FPGA 的两方面技术的图书还较少，导致大多数工程师和高校的研究生缺少系统学习的资料。鉴于此，西瑞克斯（北京）通信设备有限公司和 Xilinx 大学合作计划一起推出本书，希望能够为产业界、教育界的相关技术人员提供完整的学习资料，以帮助他们建立起先进的开发理念。

本书以 MATLAB 和 FPGA 在无线通信中的应用为主线，将有关内容分为 10 章：第 1 章介绍了无线通信系统的 FPGA 开发背景；第 2、3 章简要介绍了无线信号处理中的数字处理和数字信号处理技术；第 4~9 章较为详细地介绍了数字处理的硬件开发基础以及无线通信系统各个模块的原理与 FPGA 实现；第 10 章讲解 WCDMA 系统部分关键技术的 FPGA 实现，包括同步和多载波系统的关键技术，以提高读者的工程开发能力。

本书没有仅限于 FPGA 开发，也没有大篇幅的理论分析，而是关注如何使用 FPGA 来实现相关理论，更多地从系统开发的角度展开讨论，即首先简单介绍原理，然后给出相关的 MATLAB 代码，最后完成 FPGA 设计。之所以给出相关的 MATLAB 代码，是因为 MATLAB 已成为通信系统仿真和设计必不可少的工具，含有大量的函数模块、参考设计和文档资料，有助于开发人员理解 FPGA 实现所需的理论和算法。

本书由西瑞克斯（北京）通信设备有限公司编著，其中 LPDC 串行译码器的 FPGA 实现部分由詹仙宁完成。参与本书编写工作的还有范凌飞、周泽标、李楠、孙峥、曲昌盛、胡彬、武冠宇、章翔、李志、彭勇、徐文波、柴娟芳、彭巧乐、朱晓、张茂龙、徐振洪、喻冬华、季成俊、饶明建、郑建明、毛小玲、陆如元、王伟。

在本书的筹划和写作过程中，Xilinx 公司中国区大学计划经理谢凯年先生提供了最新版的软件和诸多参考设计资料。人民邮电出版社刘洋编辑在本书的定稿和审稿过程中付出了诸多努力，促成了本书的迅速面世。上海智翔信息服务技术有限公司的何炯先生为本书提供了非常有价值的指导意见，在此一并表示衷心的感谢。

FPGA 开发技术博大精深，且无线通信技术发展迅猛，所以不可能通过一本书进行全方位的详细介绍。此外，由于作者知识水平有限，因此书中错误和不当之处在所难免，敬请广大读者和专家批评指正。大家可通过电子邮件（liuyang@ptpress.com.cn）与我们交流。

# 目 录

第 1 章 无线通信与 FPGA 开发综述	1
1.1 无线通信的发展概况	1
1.2 无线通信的主要特点	3
1.3 无线通信系统的组成	3
1.4 未来无线通信系统的发展趋势	5
1.5 FPGA 在无线通信中的应用优势	5
1.5.1 FPGA 特征简介	6
1.5.2 FPGA 在无线通信中的应用综述	7
1.5.3 无线通信基站的 FPGA 实现架构	8
1.6 Xilinx 公司的无线通信解决方案	10
1.6.1 Xilinx 面向无线通信中的高端芯片——Virtex 系列	10
1.6.2 Xilinx 的高效开发工具——ISE Design Suite	18
1.6.3 Xilinx 公司的蜂窝通信开发资源	22
1.6.4 Xilinx 公司的广播系统开发资源	23
1.7 本章小结	24
1.8 本章参考文献	24
第 2 章 无线通信中的数字处理基础	25
2.1 数的表示	25
2.1.1 定点表示	26
2.1.2 浮点表示	27
2.1.3 定点制数的量化	28
2.1.4 加法、乘积的舍入误差	29
2.2 A/D 转换的字长效应	30
2.3 常用算术运算模块的 FPGA 实现	31
2.3.1 加法运算的 FPGA 实现	31
2.3.2 乘法运算的 FPGA 实现	31
2.3.3 除法运算的 FPGA 实现	34
2.3.4 Cordic 算法的 FPGA 实现	40
2.4 本章小结	46
2.5 本章参考文献	46
第 3 章 无线通信中的 DSP 处理基础	47
3.1 数控振荡器的 FPGA 实现	47

3.1.1	DDS 算法原理	47
3.1.2	DDS 算法的 Verilog 实现	49
3.1.3	DDS 算法 IP Core 的使用	51
3.2	快速傅里叶变换的 FPGA 实现	54
3.2.1	DFT 和 FFT 基本思想	54
3.2.2	FFT 算法的基本原理及其 MATLAB 实现	56
3.2.3	FFT 的硬件实现结构	59
3.2.4	IFFT 原理与实现	61
3.2.5	FFT/IFFT IP Core 的使用	61
3.3	FIR 滤波器的 FPGA 实现	69
3.3.1	数字滤波器的分类	69
3.3.2	数字滤波器的数学模型	70
3.3.3	数字滤波器的性能指标	70
3.3.4	FIR 滤波器的原理与设计	71
3.3.5	FIR 滤波器的 FPGA 实现	76
3.3.6	FIR 滤波器 IP Core 的使用	85
3.4	多速率滤波器的 FPGA 实现	90
3.4.1	多速率信号处理的意义	90
3.4.2	多速率信号滤波器的基本操作	91
3.4.3	CIC 滤波器的 FPGA 实现	97
3.4.4	HB 滤波器的 FPGA 实现	109
3.5	自适应滤波器的 FPGA 实现	115
3.5.1	自适应滤波简介	115
3.5.2	自适应滤波的应用	117
3.5.3	LMS 算法的 MATLAB 实现	118
3.5.4	LMS 算法的 FPGA 实现	121
3.5.5	LMS 算法的软件调试	132
3.6	本章小结	137
3.7	本章参考文献	137
<b>第 4 章</b>	<b>调制解调的实现</b>	<b>138</b>
4.1	调制/解调的基本功能与要求	138
4.1.1	调制/解调的基本功能	138
4.1.2	调制/解调的分类	138
4.1.3	基本调制方法原理及性能简要分析	139
4.1.4	数字信号的带宽和功率谱密度	140
4.1.5	影响选择数字调制方式的因素	140
4.2	数字调制/解调器的低中频解决方案	140
4.2.1	传统的调制解调方案	141

4.2.2	低中频的全数字化调制解调方案	141
4.3	2ASK 调制/解调的实现	142
4.3.1	2ASK 调制解调的基本原理和设计方法	143
4.3.2	2ASK 调制解调的 MATLAB 实现	144
4.3.3	2ASK 调制解调的 FPGA 实现	146
4.4	MPSK 调制/解调的实现	148
4.4.1	MPSK 调制解调的基本原理和设计方法	148
4.4.2	QPSK 调制解调的 MATLAB 实现	150
4.4.3	QPSK 调制解调的 FPGA 实现	150
4.5	MSK/GMSK 调制/解调的实现	152
4.5.1	MSK/GMSK 调制原理	153
4.5.2	MSK/GMSK 调制解调的 MATLAB 实现	156
4.5.3	MSK/GMSK 调制器的 FPGA 实现	157
4.6	MQAM 调制/解调的实现	162
4.6.1	QAM 调制/解调原理	162
4.6.2	QAM 调制/解调的 MATLAB 实现	164
4.6.3	QAM 全数字调制器的 FPGA 实现	165
4.7	OFDM 调制/解调的实现	168
4.7.1	OFDM 调制/解调原理	169
4.7.2	OFDM 调制/解调的 MATLAB 实现	171
4.7.3	OFDM 调制/解调的 FPGA 实现	171
4.8	本章小结	173
4.9	本章参考文献	173
<b>第 5 章</b>	<b>信道编解码的实现</b>	<b>175</b>
5.1	信道编码的原理	175
5.1.1	有噪信道编码定理	175
5.1.2	信道编码的简介	175
5.1.3	信道编码分类	176
5.2	线性分组码的实现	176
5.2.1	线性分组码的原理和性能	176
5.2.2	线性分组码的 MATLAB 实现	178
5.2.3	线性分组码的 FPGA 实现	179
5.3	CRC 校验码的实现	182
5.3.1	CRC 校验码的原理	182
5.3.2	CRC 校验码的 MATLAB 仿真	183
5.3.3	CRC 校验码的 FPGA 实现	183
5.4	RS 码的实现	185
5.4.1	RS 码的原理	185

5.4.2	RS 码的 MATLAB 实现	187
5.4.3	RS 码的 FPGA 实现	188
5.5	卷积码的实现	191
5.5.1	卷积码的原理和性能	191
5.5.2	卷积码的 MATLAB 实现	195
5.5.3	卷积码的 FPGA 实现	195
5.6	交织器的实现	207
5.6.1	交织的原理	207
5.6.2	交织器的 MATLAB 实现	209
5.6.3	交织器的 FPGA 实现	210
5.7	TCM 编码的实现	212
5.7.1	TCM 编码的原理	212
5.7.2	TCM 编码的 MATLAB 实现	214
5.7.3	TCM 编码的 FPGA 实现	215
5.8	Turbo 码的实现	216
5.8.1	Turbo 码的原理	216
5.8.2	Turbo 码的 MATLAB 实现	218
5.8.3	Turbo 码的 FPGA 实现	220
5.9	LDPC 码的实现	221
5.9.1	LDPC 码的原理	221
5.9.2	LDPC 码的 MATLAB 实现	227
5.9.3	LDPC 码的 FPGA 实现	228
5.10	本章小结	243
5.11	本章参考文献	243

## 第 6 章 最佳接收机的实现 245

6.1	最佳接收机原理	245
6.1.1	最佳接收机的统计模型	245
6.1.2	最佳接收准则及其最佳接收机	246
6.2	匹配接收机的实现	252
6.2.1	匹配接收机的原理	252
6.2.2	匹配接收机器的 MATLAB 实现	253
6.2.3	匹配接收机的 FPGA 实现	254
6.3	相关接收机的实现	257
6.3.1	相关接收机的原理	257
6.3.2	相关接收机的 MATLAB 仿真	258
6.3.3	相关接收机的 FPGA 实现	258
6.4	限带基带信道收发机的实现	261
6.4.1	基带传输及码间干扰	261



6.4.2	基带传输的奈奎斯特准则与升余弦滤波器 .....	264
6.4.3	升余弦滤波器和根号下升余弦滤波器的 FPGA 实现 .....	266
6.5	本章小结 .....	271
6.6	本章参考文献 .....	271
<b>第 7 章</b>	<b>分集、均衡和干扰抵消的实现 .....</b>	<b>272</b>
7.1	分集技术的基本原理 .....	272
7.1.1	无线信道的分析 .....	272
7.1.2	分集技术的概念和分类 .....	273
7.1.3	均衡技术的概念和分类 .....	275
7.1.4	干扰抵消技术的概念和分类 .....	276
7.2	Rake 接收机的实现 .....	279
7.2.1	Rake 接收机原理 .....	279
7.2.2	Rake 接收机的 MATLAB 实现 .....	280
7.2.3	Rake 接收机的 FPGA 实现 .....	283
7.3	智能天线的实现 .....	285
7.3.1	智能天线的基本原理 .....	286
7.3.2	智能天线的 MATLAB 实现 .....	288
7.3.3	智能天线的 FPGA 实现 .....	290
7.4	基于横向滤波器的均衡的实现 .....	292
7.4.1	基于横向滤波器的均衡技术的原理 .....	292
7.4.2	基于横向滤波器的均衡技术的 MATLAB 实现 .....	293
7.4.3	基于横向滤波器的均衡技术的 FPGA 实现 .....	295
7.5	频域干扰抵消算法的实现 .....	297
7.5.1	频域干扰抵消算法的基本原理 .....	297
7.5.2	频域干扰抵消算法的 MATLAB 实现 .....	299
7.5.3	频域干扰抵消算法的 FPGA 实现 .....	300
7.5.4	频域块 LMS 算法和时域 LMS 算法的比较 .....	311
7.6	本章小结 .....	312
7.7	本章参考文献 .....	312
<b>第 8 章</b>	<b>同步的实现 .....</b>	<b>313</b>
8.1	同步分类 .....	313
8.2	载波同步的原理及实现 .....	314
8.2.1	载波同步简介 .....	314
8.2.2	载波同步方法的分类 .....	314
8.2.3	科斯塔斯环载波同步法的 FPGA 实现 .....	316
8.3	符号同步 .....	323
8.3.1	符号同步简介 .....	323

8.3.2	插入导频符号同步法	324
8.3.3	直接符号同步法	325
8.3.4	超前—滞后门符号同步法的 FPGA 实现	327
8.4	帧同步	334
8.4.1	帧同步简介	335
8.4.2	集中插入式帧同步法的 FPGA 实现	335
8.5	本章小结	339
8.6	本章参考文献	339
<b>第 9 章</b>	<b>数字前端技术的实现</b>	<b>340</b>
9.1	软件无线电中的数字前端综述	340
9.1.1	软件无线电综述	340
9.1.2	无线通信系统的全链路结构说明	341
9.1.3	无线通信系统的数字前端介绍	342
9.2	数字前端中关键模块的 FPGA 实现	344
9.2.1	过采样 A/D 与 D/A 转换器	344
9.2.2	数字上变频和下变频的 FPGA 实现	346
9.2.3	速率转换模块的 FPGA 实现	352
9.2.4	基带信道滤波的 FPGA 实现	352
9.3	多速率信号处理模块的 FPGA 实现	358
9.3.1	多速率发送处理器	358
9.3.2	多速率接收处理器	368
9.4	高级 DFE 模块以及 Xilinx 相关解决方案	372
9.4.1	消峰技术	372
9.4.2	功放线性化技术——数字预失真 (DPD)	375
9.4.3	射频拉远接口	378
9.5	本章小结	382
9.6	本章参考文献	382
<b>第 10 章</b>	<b>WCDMA 系统关键技术的实现</b>	<b>384</b>
10.1	扩频通信技术基础	384
10.1.1	扩频通信的基本概念	384
10.1.2	正交码和伪随机码	386
10.2	WCDMA 技术基础	387
10.2.1	WCDMA 通信系统综述	387
10.2.2	WCDMA 系统物理层	389
10.3	WCDMA 系统常用模块的 FPGA 实现	395
10.3.1	WCDMA 扩频技术的 FPGA 实现	395
10.3.2	WCDMA 系统加扰技术 FPGA 实现	398

10.3.3	WCDMA 系统调制技术说明	400
10.3.4	WCDMA 信号源的 FPGA 实现	402
10.4	WCDMA 小区搜索算法的 FPGA 实现	408
10.4.1	WCDMA 系统小区搜索的原理	408
10.4.2	WCDMA 系统小区搜索的算法	409
10.4.3	WCDMA 系统小区搜索的 MATLAB 实现	413
10.4.4	WCDMA 系统小区搜索的 FPGA 实现	415
10.5	多载波 WCDMA 技术的 FPGA 实现	425
10.5.1	多载波 WCDMA 技术原理	425
10.5.2	多载波 WCDMA 调制和解调模块的 FPGA 实现	426
10.5.3	多载波 WCDMA 系统消峰技术的 FPGA 实现	431
10.6	本章小结	435
10.7	参考文献	435

# 第 1 章 无线通信与 FPGA 开发综述

进入 21 世纪以来,无线通信技术正在以前所未有的速度向前发展。随着用户对各种实时多媒体业务需求的增加和互联网技术的迅猛发展,可以预计,未来的无线通信技术将朝着数字化、综合化、宽带化、智能化和个人化的方向发展,这对社会的进步和经济的发展都有着举足轻重的作用。可编程逻辑器件产业,特别是 FPGA 器件的发展给无线通信产业带来强劲的推动力,给予设备制造商更多的灵活性,成为各种新技术的创新开发平台,加速了整个无线通信产业规模的形成。本章主要从整体上对无线通信系统的特点和 FPGA 在无线通信系统中的应用进行介绍。

## 1.1 无线通信的发展概况

顾名思义,无线通信是指通信双方至少有一方以无线方式进行信息的交换和传输,包括移动体(行人、车辆、船舶以及飞机)和移动体之间的通信,也包括移动体和固定点(固定的移动电台或有线通信)之间的通信。

无线通信的开端可以追溯到 1897 年,意大利科学家马可尼利用无线电在陆地和一只拖船之间进行了消息的传输。至今,无线通信已经有 100 多年的历史。早期的无线通信主要用于船舶、航空、列车、公共安全等领域,用户数量很少。直到 20 世纪 60 年代,贝尔实验室(Bell Lab)提出了蜂窝概念,使无线通信摆脱了传统的大区制结构,为移动系统商用奠定了基础。近 30 年来,随着社会的发展,人们对通信的需求日益迫切,对通信的要求也越来越高(理想的目标是能够在任何时候、任何地方与任何人以任何方式及时地交流信息),无线通信进入了一个飞速发展的时期,并已广泛地应用于全球各国的各个部门和人民生活的各个领域之中。

随着无线通信范围的扩大,无线通信系统也有越来越多的类型,可以分为微波通信系统、移动电寻呼系统、蜂窝无线通信、无绳电话系统、集群无线通信系统、卫星通信系统、分组移动网等典型的通信系统。其中的无线通信技术在世界范围内获得了广泛的应用,成为令人神往的高技术风景线,但就正式商业运营而言,至今也不过只有 30 年的历史。从其发展历程来看,大约每 10 年更新一代,目前处于第二代(2G)和第三代(3G)的交接期。

第一代(1G)以模拟式蜂窝网为主要特征。20 世纪 70 年代末,随着半导体技术的发展和微处理器的出现,使蜂窝系统实现的复杂度大大降低,从而进一步推动了蜂窝无线通信技术的发展。这期间,美国推出了 AMPS(Advanced Mobile Phone System)系统,欧洲推出了 TACS(Total Access Communication System)系统。1G 主要采用频分多址(FDMA)方式实现对用户的动态寻址功能。

第二代(2G)以数字式蜂窝为主要特征,于 20 世纪 90 年代初走向商用。其中,各国相应推出了今天广为人知的 GSM 和 IS-95 CDMA 等系统。2G 主要采用时分多址(TDMA,如

GSM 中)和码分多址 (CDMA, 如 IS-95 CDMA 中)实现对用户的动态寻址功能。此外还在对信道动态特征匹配上采用了抗干扰性能优良的数字式调制 (GMSK、QPSK)、纠错编码 (卷积码、级联码)、信道交织编码、自适应均衡和 Rake 接收等技术。同时, 移动数据网络得到了极大的发展, 按照覆盖范围从大到小可以分为移动数据网、移动局域网 (WLAN, 以 IEEE 802.11 系列标准为典型代表)和无线个域网 (WPAN, 以蓝牙 (Bluetooth) 技术为典型代表)。

第三代 (3G) 以多媒体业务为主要特征, 于 21 世纪初刚刚投入商业化运营。图 1-1 给出了现有移动应用解决方案的数据速率和灵活性。3G 移动网络可以分为 3G 蜂窝网和由各种 WLAN、WPAN 系统组成的宽带接入系统。其中, 最具代表性的蜂窝网有北美的 cdma2000, 欧洲与日本的 WCDMA 以及我国的 TD-SCDMA 系统, 都以码分多址 (CDMA) 实现对用户的动态寻址功能, 以 2G 为基础, 以业务多媒体化为主要目标。各种与蜂窝系统相补充的宽带接入系统也得到了迅速发展, 特别是以 IEEE 802.16 系列标准 (WiMAX) 为代表的移动城域网技术, 成为有线接入和 3G 蜂窝网强有力的竞争对手, 并于 2007 年 10 月成为 ITU 的 3G 标准之一。WiMAX 技术可实现点到多点的通信, 可提供高速的双向语音、数据、视频服务。同时移动广域网的技术也在进一步发展中, 期望填补现有技术 (蜂窝网、WLAN、WPAN 和 WMAN) 之间的空白, 提供比现有宽带接入技术更高的移动性、比蜂窝网更高的数据传输速率。

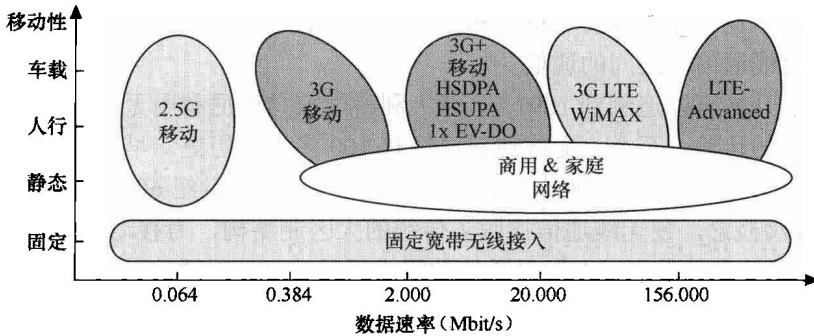


图 1-1 不同移动应用解决方案的数据速率和灵活性示意图

目前, 世界各国均已展开对下一代无线通信系统 (B3G/4G) 的研究和开发, 以期达到理想的通信目标, 并取得了显著成果。B3G/4G 主要采用 OFDM、多跳、中继和多天线等新技术, 将向用户提供 1Mbit/s 甚至 100Mbit/s 的数据速率。这些先进的技术大大提高了无线通信系统的数据传输速率和通信的可靠性, 增强了系统功能, 扩大了应用领域和服务范围。可以预计, 无线通信的未来更令人瞩目和神往。

在同样的带宽资源下, LTE 不比 3G 提供的网络更加高效, 但 LTE 的优势在于, 如果运营商能拿到更高的频谱资源, 它能够满足大规模应用的需求。LTE 能支持多人同时使用大的数据应用。可以认为, LTE 是现有 3G 网络的补充, 而非对现有 3G 网络的替代。在人口密度大、数据量需求强烈的地区, LTE 是个很好的解决方案。

就技术层面而言, 未来真正的 4G 技术将不是 LTE, 而是 LTE-Advanced。虽然此项技术在目前仍需经历一段发展时期, 但是在 2012 年后, IP Based 网络及 MIMO-OFDMA 技术,



将逐渐被纳入成为此技术的核心，也将会成为未来 4G 的关键技术基础。

无线通信的发展过程及趋势可以概括为如下几点。

- (1) 工作频段从短波、超短波、微波发展到毫米波、红外和超长波。
- (2) 频道间隔由 100kHz、50kHz、25kHz 发展到 12.5kHz 甚至更窄。
- (3) 调制方式由振幅压扩单边带模拟调制发展到数字调制。
- (4) 多址方式由 FDMA、TDMA、CDMA 发展到混合多址，以及固定多址和随机多址的结合。
- (5) 业务类型由语音发展到数据、传真，直到多媒体综合业务。

## 1.2 无线通信的主要特点

无线通信针对有线通信静态的缺点，以开放式传播来传递信息，打破了一定要有全封闭链路的限制，并将通信方式从静态推广到可移动的准动态。其代价是牺牲了全封闭的优质人造信道，来换取无须采用固定介质专用线路的开放式传输的灵活性，但是信道的开放性必然引起信道的时变性和随机性<sup>[1-2]</sup>，从而大大降低通信容量和质量。

首先，无线通信必须利用移动电波进行信道传输。与有线信道相比，移动电波的传播特性一般都很差，而且不同用户在传输中还会相互干扰，因此建立无线通信系统比有线系统复杂。一方面，无线通信的工作环境十分复杂，电波不仅会随着传播距离发生弥散损耗，并且会受到地形、地物的遮蔽而发生“阴影效应”；而且信号经过多点反射，会从多条路径到达接收地点，这种多径信号的幅度、相位和到达时间一般都不相同，它们相互叠加会产生电平衰落和时延扩展。另一方面，无线通信经常在快速移动中进行，这不仅会引起多普勒 (Doppler) 频移，产生随机调频，而且还会使得电波的传播特性发生快速的随机起伏，严重影响通信的质量。

其次，无线通信是在复杂的干扰环境中进行的。除去一些常见的外部干扰，如天电干扰、工业干扰和信道噪声外，系统本身和其他系统之间，还会产生不同类型的干扰。因为在无线通信系统中，经常有多个用户在同一地区工作，这些用户之间会产生干扰。随着无线通信制式的不同，所产生的干扰也不相同。归纳起来讲，这些干扰有邻道干扰、互调干扰、共道干扰、多址干扰，以及近地无用信号压制远地有用弱信号的现象等。

再次，无线通信的频谱资源非常有限。无线通信的资源有限，而用户又越来越多。为了解决这一矛盾，一方面要开辟和启用新的频段；另一方面要研究各种新技术和新措施，以压缩信号所占用的带宽和提高频谱利用率。

实际上，任何一种无线通信系统都会采用一些先进的信号处理技术来尽可能解决上述 3 个方面的问题，以达到系统有效、可靠和安全的目的。这些先进技术的原理及其相应的 MATLAB 和 FPGA 实现正是本书所关注的内容。

## 1.3 无线通信系统的组成

通常把实现信息传输的系统称为通信系统，图 1-2 表示了一个通信系统的基本组成。在通信系统中，一般要进行两种变换与反变换。在发送端，第一个变换是输入变换器，它把要

传输的信号变成电信号，该信号一般是低频的，而且包括零频附近的分量，通常把该信号称为基带信号。第二种变换是把基带信号变成成为适合在信道中传输的信号形式，并送入信道，该变换一般称为调制。在接收端，接收机和发射机的功能相反，它从信道中选取接收信号的已调波并将其变为基带信号，此变换称为解调。输出变换器再把解调后的基带信号变换为相应的信息。

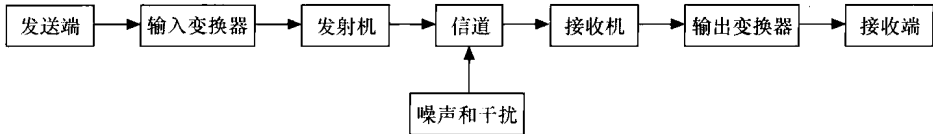


图 1-2 通信系统的基本组成

在无线通信系统中，还需要将基带信号变成射频已调信号。其原因主要有两点：第一是在通信中必须把电磁波有效地辐射出去。但是为了有效地将信号能量辐射到空间，天线的长度至少是信号波长的 1/10。那么如果直接辐射语音信号，则需要 300km 的天线，这在实际中是不可能的。因此为满足这一特性，发射信号必须是高频的。采用高频的第二个原因就是为有效地利用频带。只有将不同移动系统的信号混频到不同频率的载波上，变成中心频率不同的频带信号，接收机才能任意地选择所需要的信号而抑制无用信号的干扰。

如果按照电路结构来划分，无线通信系统可以粗略地划分为基带单元、射频单元和天线单元。随着人们对通信指标要求的不断提高，无线通信系统也越来越复杂。为了便于实现系统中不同的处理功能，当前无线通信系统进一步分为基带单元、中频单元、射频单元和天线单元等部分，其结构如图 1-3 所示。

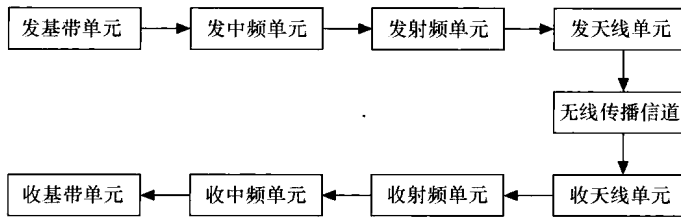


图 1-3 现代无线通信系统的组成框图

基带单元主要完成的功能如下。

- (1) 发送端：信源压缩、交织、信道编码、基带调制以及基带成形等。
- (2) 接收端：均衡、解调、去交织以及信源解压缩等。

中频单元主要完成的功能如下。

- (1) 发送端将基带复矢量与发送端中频本振相乘，再经中频放大滤波输出。
- (2) 接收端作相反操作。

射频单元主要完成的功能如下。

- (1) 发送端将信号调制到发射频率上。
- (2) 接收端把射频信号解调到中频。

天线单元用于发送和接收信号。

在基站端的基带处理中，超大规模集成电路（VLSI），特别是 FPGA 器件占有非常重要

的地位。

## 1.4 未来无线通信系统的发展趋势

无线通信以其移动性和个人化服务为特征，表现出旺盛的生命力和巨大的市场潜力。以宽带和提供多媒体业务为特征的新一代移动与无线通信的发展，将以市场为导向，带动新技术和新业务的发展，不断摸索新型的经营模式。无线通信未来的发展趋势表现为：各种移动技术互补发展，各尽所长，向接入多元化、网络一体化、应用综合化的宽带化、IP 化、多媒体化移动网络发展。

### 1. 多层移动技术有效互补

无线通信领域各种技术的互补性日趋鲜明。这主要表现在不同的接入技术具有不同的覆盖范围、不同的适用区域、不同的技术特点、不同的接入速率。未来的无线通信网络将是综合的一体化的解决方案。各种移动技术都将在这个一体化的网络中发挥自己的作用，找到自己的天地。从大范围公众无线通信来看，3G 和 B3G 技术将是主导，从而形成对全球的广泛无缝覆盖；而 WLAN、WAN、UWB 等宽带接入技术，将因其自己不同的技术特点，在不同覆盖范围或应用区域内，与公众无线通信网络形成有效互补。

### 2. 核心网络一体化、接入层面多样化

在接入网技术出现多元化的同时，核心网络层面以 IMS 为会话和业务控制的网络架构，成为面向多媒体业务的未来网络融合的基础。面向未来的核心网络采用开放式体系架构和标准接口，能够提供各种业务的综合，满足相应的服务质量，支持移动/漫游等移动性管理要求，保证通信的安全性。

### 3. 无线通信业务应用综合化

无线通信业务应用将更好地体现“以人为本”的特征，业务应用种类将更为丰富和个性化，质量更高；通信服务的价值链将进一步拉长、细分和开放，形成新的、开放式的良性生态环境，业务应用开发和提供将适应此变化，以开放应用接口的方式替代传统的封闭式业务开发和提供模式。

### 4. 无线通信终端功能完善化

无线通信终端将呈现综合化、智能化和多媒体化的发展趋势，未来移动终端的功能和性能将更加强大，成为集数据处理、多媒体视听和无线通信于一体的个人数据通信中心。

移动技术的发展让信息传输的应用日趋广泛，带给人们越来越多的全新体验。移动技术无疑成为整个通信领域发展的重点，这必将给无线通信系统芯片的设计带来更多的机遇与挑战。

## 1.5 FPGA 在无线通信中的应用优势

现场可编程门阵列（FPGA）芯片在许多领域均有广泛的应用，特别是在无线通信领域里，由于具有极强的实时性和并行处理能力，使其对信号进行实时处理成为可能。本节不仅对 FPGA 技术在现有无线通信中的应用领域作了详细的分析，还对其在未来无线通信中的应用发展作了展望。

## 1.5.1 FPGA 特征简介

### 1. FPGA 器件简介

随着现代微电子技术和工艺的发展，数字集成电路从电子管、晶体管、中小规模集成电路逐步发展到今天的超大规模集成电路（VLSI）专用集成电路（ASIC）。集成电路的一个重要特点是产品更新换代的周期很长。对于大部分设计公司，产品面市时间（Time to Market）的长短是公司生存的关键。据预算，产品面市时间延迟2~3个月，将使产品生命周期和利润总和降低一半左右。所以ASIC虽然具有成本、可靠性和芯片尺寸上的优势，但由于灵活性差、投入大和设计时间长等缺陷的制约，就难以适应快变的市场需求。因此可编程逻辑器件（Programmable Logic Device, PLD）应运而生，它提供了灵活的设计方法，系统硬件工程师可以根据需要，自行设计并更改大规模的数字逻辑，研制自己的ASIC并马上投入市场。

可编程逻辑器件是20世纪70年代发展起来的一种新型逻辑器件，随着微电子制造工艺的发展，它也取得了长足的进步，是目前数字系统设计的主要硬件基础。FPGA是在PAL、GAL、EPLD、CPLD等可编程器件的基础上进一步发展的产物。它是作为ASIC领域中的一种半定制电路而出现的，既解决了定制电路的不足，又克服了原有可编程器件门电路有限的缺点。FPGA一般采用SRAM工艺，也有一些军品和宇航级FPGA采用Flash或熔丝与反熔丝工艺。FPGA的集成度很高，其器件密度从数万门到数千万门不等，可以完成极其复杂的时序与逻辑组合逻辑电路功能，适用于高速、高密度的高端数字逻辑电路设计领域。其组成部分主要有可编程输入/输出单元、基本可编程逻辑单元、内嵌SRAM、丰富的布线资源、底层嵌入功能单元、内嵌专用单元等，主要设计和生产厂家有Xilinx、Altera、Lattice、Actel、Atmel和QuickLogic等公司，其中最大的是Xilinx、Altera、Lattice3家。

如前所述，FPGA是由存放在片内的RAM来设置其工作状态的，因此工作时需要对片内RAM进行编程。用户可根据不同的配置模式，采用不同的编程方式。FPGA有如下几种配置模式<sup>[6]</sup>。

- (1) 并行模式：一片EPROM配置一片FPGA。
- (2) 主从模式：一片EPROM配置多片FPGA。
- (3) 串行模式：串行PROM配置FPGA。
- (4) 外设模式：将FPGA作为微处理器的外设，由微处理器对其编程。

目前，FPGA市场占有率最高的两大公司Xilinx和Altera生产的FPGA都是基于并行模式的，需要在使用时外接一个EPROM保存程序。上电时，FPGA将EPROM中的数据读入片内RAM，完成配置后，进入工作状态；掉电后FPGA恢复为白片，内部逻辑消失。FPGA不仅能够反复使用，还无需专门的FPGA编程器，只需通用的EPROM、PROM编程器即可。Actel、QuickLogic等公司提供反熔丝技术的FPGA，只能下载一次，具有抗辐射、耐高低温、功耗低和速度快等优点，在军品和航空航天领域中应用较多，但这种FPGA不能重复擦写，开发初期比较麻烦，费用也比较昂贵。Xilinx和Altera一般不涉及军品和宇航级市场。Lattice是ISP技术的发明者，在小规模PLD应用上有一定的特色。

### 2. FPGA和DSP器件的区别

DSP从根本上讲是适合串行算法的，多处理器系统是很昂贵的，而且只适合粗粒度的并行运算；FPGA可以在片内实现细粒度，高度并行的运算结构。FPGA和DSP两者各有所长。