



Xilinx公司大学计划
官方指定教材

康桂霞 主编
刘达王晶 张勍王桂馨 副主编

FPGA应用技术 教程

21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

Application of FPGA Technology



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



CD-ROM



精品系列



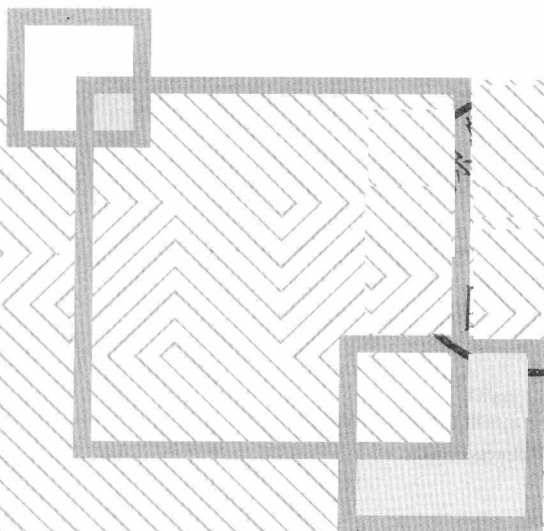
Xilinx公司大学计划
官方指定教材

康桂霞 主编
刘达王晶张劼王桂馨 副主编

FPGA应用技术 教程

21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

Application of FPGA Technology



人民邮电出版社

北京



精品系列

图书在版编目 (C I P) 数据

FPGA应用技术教程 / 康桂霞主编. -- 北京 : 人民邮电出版社, 2013. 6
21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
ISBN 978-7-115-31001-9

I. ①F… II. ①康… III. ①可编程逻辑器件—高等学校—教材 IV. ①TP332.1

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第068390号

内 容 提 要

本书以 Xilinx 公司的 FPGA 及其开发平台为基础, 综合 FPGA 和信息通信技术两个方向, 以图文并茂、深入浅出的方式, 全面、系统地介绍信息通信技术以及 FPGA 技术的相关发展、FPGA 的基本原理、硬件开发流程、开发平台、VHDL 语言, 以及在信息通信领域开发中常用的仪器仪表等。内容涵盖了 FPGA 开发的主要方面, 并精选了信息与通信技术中的常用关键模块, 进行详尽深入的讲解指导, 增强了与读者的互动性。书中内容结合作者多年的教学实践以及实际开发经验, 具有很高的学习参考和实践指导价值。

本书内容注重系统化诠释, 针对性较强, 可满足学习指导和实际工程开发的需求。本书可作为高等院校通信工程、电子信息工程、计算机、微电子与集成电路等相关专业的本科生以及研究生的教材与学习参考书, 也可作为电子信息 and 通信工程师、可编程逻辑开发人员的实用工具书。

-
- ◆ 主 编 康桂霞
 - 副 主 编 刘 达 王 晶 张 勍 王桂馨
 - 责任编辑 李海涛
 - 责任印制 焦志炜
 - ◆ 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 电子邮件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京鑫正大印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 14.25 2013 年 6 月第 1 版
字数: 357 千字 2013 年 6 月北京第 1 次印刷
-

定价: 45.00 元 (附光盘)

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223
反盗版热线: (010)67171154

当今社会,人类在生活、工作、学习、娱乐等多方面都经历了巨大的进步与变化,不可否认,信息通信技术起到了极其重要的作用,它已渗透到全球的各个角落,促进了全人类经济与文化的不断发展,使其实现方式呈现多样化。其中,FPGA(Field Programmable Gate Array,现场可编程门阵列)作为可编程逻辑器件的一种,因具有可即时编程、重复编程、可并行执行任务、使用灵活等其他电路没有的优点,在通信、数据处理、网络、仪器、工业控制、军事、航空航天等众多领域得到了广泛应用,目前已成为实现数字系统的主流平台之一。

Xilinx 公司是全球最大的可编程逻辑器件制造商,在芯片设计领域和 FPGA 开发工具方面一直引领最新潮流。本书运用其新近推出的 Xilinx ISE 12.2 开发套件,以学习开发常用的 Spartan-3E 系列 FPGA 为开发平台,对书中列举的实例进行讲解和实现。先进的开发环境和开发平台让读者能通过本书更快更好地适应当今快速发展的可编程逻辑器件的开发。

本书以信息通信技术的 FPGA 应用和开发为主线,追求全面和系统的实用效果,综合 FPGA 和信息通信技术两个方向,以 Xilinx 公司的 FPGA 为主要开发平台进行介绍。全书共分为 6 章。第 1 章介绍信息通信领域关键技术和可编程逻辑器件的发展现状及发展趋势,随后阐述 FPGA 技术在上述信息通信领域典型技术中的应用范围及前景。第 2 章对可编程逻辑器件的发展历程和两种典型器件(CPLD、FPGA)的基本结构及原理进行了概述,并对 Xilinx 公司的主流 FPGA 器件的结构和发展进行了介绍,然后给出了 FPGA 开发的一般设计流程及其在 DSP 领域的开发环境和方法。第 3 章通过实例设计介绍 Xilinx ISE 12.2 工具套件的使用,通过演示工程创建、设计输入、仿真、综合、添加用户约束、实现、配置 FPGA 的整个过程对软件的基本用法进行了讲解,便于读者熟悉 FPGA 开发环境和基本开发流程。第 4 章介绍 VHDL 硬件描述语言的基础知识,并由浅入深地给出了 VHDL 设计实例,包括组合逻辑电路的八个设计实例及通信系统中的七个应用实例,方便读者掌握 VHDL 硬件描述语言本身及其建模方法。在第 4 章的小结部分,特别根据本书作者的实践经验,给出了 VHDL 语言在使用中的注意事项及初学者经常会出错的例子。第 5 章主要针对本书实验所用开发平台——Xilinx 公司 Spartan-3E 系列 FPGA 开发套件和通信实验过程中经常用到的仪器仪表进行介绍,使读者在夯实理论基础的同时对相关实验平台和工具也有一定的认识和了解。第 6 章精选了信息通信领域的常用关键模块,对其原理和 FPGA 实

现进行了较为详尽的讲解，在每个实验课题后还增加了实验拓展部分，以供读者进行更为深入的探究，增强了与读者的互动性。

本书的附带光盘包含了书中所有工程实例的源代码文件，还收录了 Xilinx 公司针对本书 Spartan-3E 系列 FPGA 开发板的部分官方实例，希望可以为读者的学习和参考提供更多的方便。

本书可作为高等院校通信工程、电子信息工程、计算机、微电子与集成电路等相关专业的本科生以及研究生的教材或学习参考书，也可作为电子与通信领域教师的教学实践指导用书，对电子通信领域的相关研究人员和工程开发人员也具有很高的参考价值和借鉴意义。

本书是北京邮电大学无线传输与应用研究室（WTA）集体智慧的结晶，是研究室多年来承担相关教学与科研实践的成果，也是学校教改项目的成果。特别感谢参与本书相关实验并提出反馈与编写建议的黄冬艳、刘佳、刘晓爽、王豪、黄开、梁霄、郭磊、赵英蛟、董如月、李聪聪等同学。同时也对本书所有参考文献的作者表示衷心的感谢。最后还要感谢 Xilinx 公司和依元素公司的大力支持与积极推动，以及人民邮电出版社的辛勤工作，使得本书能尽早与读者见面。

由于编者水平有限，书中难免存在不当之处，敬请读者批评指正，提出宝贵意见。

编 者

2013 年 4 月

目 录

第 1 章 信息与通信技术及 FPGA	
开发综述	1
1.1 信息与通信技术的发展概况	1
1.1.1 计算机技术的发展概况	1
1.1.2 信号处理技术的发展	3
1.1.3 通信技术的发展概况	4
1.2 可编程逻辑器件发展概况	8
1.2.1 CPLD	10
1.2.2 FPGA	10
1.3 未来 FPGA 技术的发展趋势	11
1.3.1 芯片工艺的发展趋势	11
1.3.2 基于 FPGA 的嵌入式系统 (SoPC) 技术应用	11
1.3.3 基于 IP 库的设计方法	12
1.3.4 动态可重构技术	13
1.4 FPGA 在信息与通信领域的应用	13
1.4.1 FPGA 在计算机技术中的应用	13
1.4.2 FPGA 在数字信号 处理中的应用	14
1.4.3 FPGA 在无线通信 系统中的应用	14
1.5 本章小结	15
第 2 章 FPGA 设计基础	16
2.1 可编程逻辑器件结构简述	16
2.1.1 基于乘积项 (Product-Term) 的 PLD	16
2.1.2 基于查找表 (Look-Up-Table) 的 PLD	19
2.2 Xilinx FPGA 器件	23
2.2.1 Spartan 类	23
2.2.2 Virtex 类	28
2.2.3 最新 FPGA 简介	32
2.3 FPGA 的一般设计流程	33
2.3.1 设计准备	34
2.3.2 设计输入	34
2.3.3 功能仿真	35
2.3.4 设计处理	35
2.3.5 时序仿真	36
2.3.6 器件编程与测试	36
2.4 FPGA 在 DSP 领域中的开发	36
2.4.1 利用 MATLAB 辅助 FPGA 的 逻辑设计	38
2.4.2 Simulink 简介	38
2.4.3 System Generator 工具简介	39
2.4.4 Simulink 和 System Generator 联合开发	39
2.5 本章小结	43
第 3 章 ISE 软件使用指南	44
3.1 Xilinx 公司的 EDA 集成开发工具	44
3.2 ISE 12.2 软件的设计流程	45
3.2.1 创建工程	45
3.2.2 设计输入	48
3.2.3 仿真	53
3.2.4 综合及添加用户约束	58
3.2.5 实现和编程下载	60
3.3 本章小结	63
第 4 章 VHDL 介绍及实例	64
4.1 VHDL 的基本概念	64
4.1.1 什么是 VHDL	64
4.1.2 VHDL 的历史	64
4.1.3 VHDL 的优点	65
4.2 VHDL 的语法基础	66
4.2.1 VHDL 的对象	66
4.2.2 VHDL 的数据类型	67
4.2.3 VHDL 的运算操作符	69
4.2.4 VHDL 的主要描述语句	71
4.3 VHDL 的基本结构	81
4.3.1 实体说明	81

4.3.2 结构体 (构造体)	83	二、实验原理	183
4.3.3 库、程序包及配置	84	三、实验仪器	185
4.4 VHDL 设计实例简析	86	四、实验内容	185
4.4.1 组合逻辑电路的设计	86	五、实验扩展	186
4.4.2 VHDL 在通信系统中的应用	112	实验 5 简单计算器的 VHDL 实现	186
4.5 本章小结	133	一、实验目的	186
第 5 章 实验装置与仪表	137	二、实验原理	186
5.1 实验开发平台	137	三、实验仪器	188
5.1.1 Spartan-3E 开发套件	137	四、实验内容	188
5.1.2 模块简介与管脚映射	138	五、实验扩展	189
5.2 实验仪表	156	实验 6 16QAM 调制解调的	
5.2.1 脉冲信号发生器	156	VHDL 实现	189
5.2.2 数字示波器	158	一、实验目的	189
5.2.3 逻辑分析仪	162	二、实验原理	189
5.2.4 误码仪	166	三、实验仪器	192
5.3 本章小结	170	四、实验内容	192
第 6 章 实验指导	171	五、实验扩展	193
实验 1 OFDM 系统中 FFT 的		实验 7 线性分组码和 CRC 校验码	
VHDL 实现	171	编译码的 VHDL 实现	193
一、实验目的	171	一、实验目的	193
二、实验原理	171	二、实验原理	193
三、实验仪器	174	三、实验仪器	195
四、实验内容	174	四、实验内容	195
五、实验扩展	175	五、实验扩展	196
实验 2 数字频率计的设计与实现	175	实验 8 卷积码编译码的 VHDL 实现	196
一、实验目的	175	一、实验目的	196
二、实验原理	175	二、实验原理	196
三、实验仪器	176	三、实验仪器	200
四、实验内容	176	四、实验内容	200
五、实验扩展	177	五、实验扩展	201
实验 3 FIR 的 VHDL 实现	178	实验 9 实现一个用于 CDMA 2000	
一、实验目的	178	系统的短帧交织器	201
二、实验原理	178	一、实验目的	201
三、实验仪器	180	二、实验原理	201
四、实验内容	180	三、实验仪器	204
五、实验扩展	182	四、实验内容	205
实验 4 PS2 键盘接口的		五、实验扩展	205
VHDL 实现	182	实验 10 QPSK 信号的匹配接收机	205
一、实验目的	182	一、实验目的	205

二、实验原理	206	实验 12 WCDMA 系统扩频码	
三、实验仪器	208	(OVSF 码) 和下行扰码	
四、实验内容	208	发生器的 VHDL 实现	212
五、实验扩展	209	一、实验目的	212
实验 11 哈达码矩阵的相关		二、实验原理	213
接收机的 VHDL 实现	209	三、实验仪器	216
一、实验目的	209	四、实验内容	216
二、实验原理	210	五、实验扩展	217
三、实验仪器	212	附录 英文缩略语	218
四、实验内容	212	参考文献	220
五、实验扩展	212		

21 世纪,人类在生活、工作、学习、娱乐等多方面发生了巨大的进步与变化,不可否认,在这些进步与变化中,信息通信技术起到了极其重要的作用,它已渗透到了全球的各个角落,促进了全人类经济与文化的不断发展。计算机技术、信号处理技术实现了不同国家、不同地区人们的近距离的沟通与协作,使人们之间的沟通更方便,更快捷;通信技术改变了人类的生活方式,让人们从即时通信、远程教育中感受到现代化与信息化的丰富多彩。整个信息通信技术产业的发展正呈现出一片勃勃生机,而现场可编程门阵列(Field Programmable Gate Array, FPGA)属于可编程逻辑器件的一种,因具有可即时编程、重复编程、可并行执行任务等其他电路没有的优点,日益成为计算机各类技术、信号处理、无线通信等关键技术实现的载体,目前已成为实现数字系统的主流平台之一。

1.1 信息与通信技术的发展概况

当代信息通信技术的发展是全方位的。计算机已经完全超越了以前作为科学计算工具的使用范畴,由于其部件的集成化、小型化、微型化,其信息处理、存储技术的日渐成熟,计算机正以多种形态存在于人类日常的生产生活中。通信技术也从有线到无线,从地面到空中,从电通信到光通信以及各种新业务的综合,尤其是它和计算机技术的结合,进一步推动了现代通信技术的发展。现代通信的发展将以能够随时随地提供语音、数据与图像三者任意结合的服务为目标。数字化、宽带化、高速化、综合化、智能化、个性化和全球化仍是通信技术的发展趋向。

1.1.1 计算机技术的发展概况

1. 计算机的产生和更新

最早用于计算的机器产生于 17 世纪,后来的一个世纪又出现了模拟计算机。虽然到 20 世纪 30 年代,模拟计算机仍备受重视,但实际上,其专用性、低精度、较低的可靠性和稳定性导致了它无法大规模推广应用。1946 年,宾夕法尼亚大学研制成功了世界上第一台电子数字计算机,如图 1-1 所示。

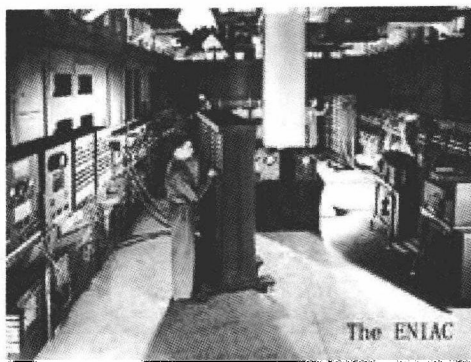


图 1-1 史上第一台电子数字计算机

后来计算机硬件的发展受到了电子开关器件的极大影响。为此，器件更新被作为计算机技术进步划时代的标志。由于第一代电子管计算机体积大、功耗大、故障率高、运行速度也很慢，第二代计算机主要采用晶体管作为开关元件，因此被称为晶体管计算机。与第一代计算机相比，第二代计算机的体积小、功耗低、可靠性高、运算速度也快。最初的晶体管计算机为 1956 年美国军用的 Leprechan。20 世纪 60 年代中后期到 70 年代中期出现的第三代计算机以集成电路为基础器件，这是微电子与计算机技术相结合的一大突破。到 20 世纪 70 年代中后期以后，计算机更新到第四代，普遍采用了大规模集成电路和超大规模集成电路技术，自此以后，计算机硬件价格急剧下降，计算机性价比迅速提高。

2. 计算机软硬件上的发展

在芯片方面，计算机经历了 4 位机、8 位机、16 位机和 32 位机的时代，现在也已有很多的 64 位机出现，这意味着更高的处理速度；服务器方面，早期的集中式主机模式逐渐被客户机/服务器模式所取代，如今已发展为基于 Internet 和 Web 技术的三层模式；存储设备也将向网络化发展，通过高速光纤通道与其存储交换设备通道连接在一起，并实现集中管理，其动态分布和分配使应用软件所需的存储容量变得十分灵活，网络化存储设备可实现网络连到哪里，存储设备也分布到哪里；以太网的速度也发展为如今的吉比特，令网络交流更加快捷；多种应用平台能够实现软件和信息的广泛共享；多媒体技术使计算机具有综合处理声音、文字、图像和视频信息的能力，其丰富的声、文、图信息和方便的交互性与实时性，极大地改善了人机界面，改善了计算机的使用方式，为计算机进入人类生活的各个领域打开了大门。

此外，大规模集成电路的出现，引领计算机成为一个电子自动化设计发展的平台，现在，通过将计算机和微电子技术结合，可以使用计算机完成可编程逻辑器件和专用集成电路的设计，这极大地促进了数字电路技术的发展。例如，单片机就是一种集成电路芯片，是采用超大规模集成电路技术把具有数据处理能力的中央处理器（Central Processing Unit, CPU）、随机存储器（Random Access Memory, RAM）、只读存储器（Read-Only Memory, ROM）、多种 I/O 口和中断系统、定时器/计时器等功能（可能还包括显示驱动电路、脉宽调制电路、模拟多路转换器、A/D 转换器等电路）集成到一块硅片上构成的一个小而完善的计算机系统。单片机的结构如图 1-2 所示，单片机作为两者结合的一个较为广泛的应用，已经渗入到人类生活的方方面面。

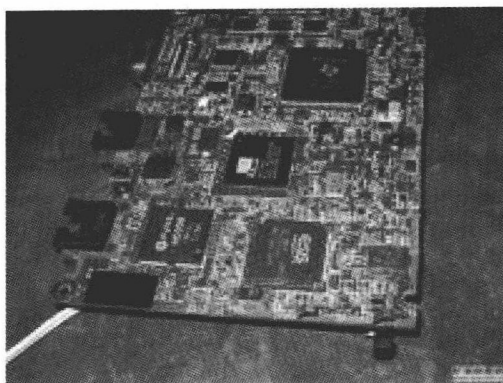


图 1-2 单片机

3. 计算机的发展趋势

计算机发展到第四代，受到了冯·诺依曼体系的制约，目前国际上已经提出第五代电子计算机的概念，所谓第五代计算机，即是把信息采集、存储、处理、通信同人工智能结合在一起的智能计算机系统。它能进行数值计算或处理一般的信息，主要能面向知识处理，具有形式化推理、联想、学习和解释的能力，能够帮助人们进行判断、决策、开拓未知领域和获得新的知识。人机之间可以直接通过自然语言（声音、文字）或图形图像交换信息。第五代计算机又称新一代计算机，是为适应未来社会信息化的要求而提出的，与前四代计算机有着本质的区别，如果能够广泛实现，将是计算机发展史上的一次重要变革。

1.1.2 信号处理技术的发展

随着计算机和信息理论的快速发展，一系列信号处理技术也迅速发展，目前在图像、语音、数字信号及视频方面都比较成熟，被视为一门单独的学科体系。信号处理，即是把记录在某种媒体上的信号进行处理，以便抽取出有用信息的过程，它是对信号进行提取、变换、分析、综合等处理过程的统称，它为了得到反映事件变化本质或处理者感兴趣的的信息而采取的过程，分为模拟信号处理（Analogue Signal Processing, ASP）和数字信号处理（Digital Signal Processing, DSP）。模拟信号处理技术，通常处理一些模拟信号，即在时间和取值上都连续的信号，通常通过一些模拟器件，如电容、电阻、电感、放大器等来实现。数字信号处理技术是在模拟信号处理技术之后发展起来的，它主要处理一些数字信号，即在时间和取值上都离散的信号。通常来说，数字信号相比模拟信号有很多的优点。因此，现在的数字信号处理技术，占了信号处理的绝大部分，人们通常是先把模拟信号变成数字信号，然后利用高效的数字信号处理器或计算机对其进行数字信号处理。

1. 信号处理技术的发展

1982 年以前，信号处理一直是以模拟信号为主，直到 1982 年第一片数字信号处理器 TMS320C10 产生，至此开始了数字信号处理的历程。数字信号处理技术发展大致经历了 4 个阶段，也形成了目前 DSP 的四代产品。第一代 DSP 以 1982 年 TI（Texas Instruments）公司推出的 TMS320C10 为代表，它是 16 位定点 DSP，首次采用哈佛结构，完成乘累加运算时间为 390ns，处理速度较慢。1987 年，Motorola 公司推出了第二代 DSP 产品 DSP56001，它是 24 位定点 DSP，完成乘累加运算时间为 75ns。第二代也有其他产品，如 AT&T 公司的

DSP16A, ADI (Analog Devices Inc.) 公司的 ADSP-2100, TI 公司的 TMS320C50 等。1995 年, 第三代 DSP 出现, 其在第二代基础上, 通过改进内部结构, 增加并行处理单元, 扩展内部存储器容量, 提高了处理速度, 指令周期为 20ns 左右。最具代表性的有 Motorola 公司的 DSP56301, ADI 公司的 ADSP-2180, TI 公司的 TMS320C541 等。同期还出现了功能更强的 32 位浮点处理的 DSP, 如 Motorola 公司的 DSP56000, TI 公司的 TMS320C3X, ADI 公司的 ADSP-21020 等。最近几年推出了性能更高的第四代处理器, 包括并行处理结构 DSP 和超高性能 DSP, 如 ADI 公司的 32 位浮点处理器 SHRAC 系列 ADSP2106X、TI 公司的 TMS320C4X 等, 以及后来 TI 公司推出的并行处理定点系列 TMS320C62XX、浮点系列 TMS320C67XX, ADI 公司的并行处理浮点系列 ADSP21160 和 TigerSHARC 系列 ADSP-TS101S、ADSP-TS201 等。

2. 信号处理技术的内容

目前的数字信号处理技术已经发展出了一套成熟的理论体系, 包括信号采集理论、离散信号分析理论、离散系统分析理论、快速算法、滤波技术、信号的估计与检测理论、信号建模理论、信号处理的现代方法、信号处理的实现和应用。目前, 数字信号处理已经广泛应用于社会各个领域, 包括通信、语音、图像、视频、消费电子、仪器、医疗、军事等。在实际生活中, 我们通常接触到的信号都是模拟信号, 于是将一个模拟信号接收后转换成一个数字信号来进行处理, 然后再转换为模拟信号, 整个处理的流程如图 1-3 所示。

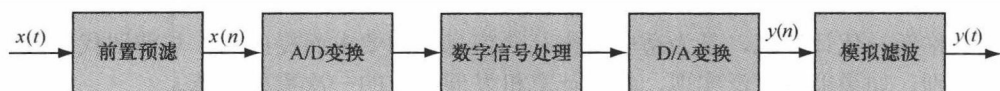


图 1-3 数字信号处理的简单方框图

3. 信号处理技术的发展趋势

随着信号处理所需计算量的不断提高, 传统的 DSP 模块已经不能够稳定地处理一些复杂度和功耗都比较大的系统, 可编程逻辑器件的出现, 很好地解决了这一难题, 它的性能和密度相比 DSP 模块都大大提高, 并且支持并行计算, 所以有时候常单独使用或者与 DSP 模块一起使用来处理数字信号。随着可编程逻辑器件的不断更新, 数字信号处理必将得到更大的发展。

1.1.3 通信技术的发展概况

随着社会的发展, 人们对信息传递和交换的要求越来越高, 这促进了通信系统理论的形成, 并使通信技术得到了迅猛的发展。

1. 通信技术的发展历程

自从 1844 年美国莫尔斯 (S.B.Morse) 发明了莫尔斯电码, 并在电报机上传递了第一条电报, 通信时空的差距就大大缩小了。1876 年, 贝尔发明了电话, 首次使相距数百米的两个人可以直接清晰地进行对话。两年后, 人工交换机产生了, 从此就有了第一个模拟电话网络。电话交换技术经历了从人工到自动, 从机电到电子、从布控到程控、从空分到时分、从模拟到数字的阶段。与此同时无线通信开始出现, 1896 年, 无线电报的实现标志着无线电通信的开始, 1906 年, 电子管的发明, 迅速提高了无线通信和有线通信的水平。随着通信技术的发展, 通信科学在 20 世纪 30 年代有了突破性进展, 先后形成了脉冲编码理论、信息理论、通信统计理论等重要理论体系。到 20 世纪 50 年代以后, 晶体管和集成电路的问世, 促进了

通信技术的高速发展,也促成了其广阔的前景。到现在,有线通信以光纤通信为代表,低损耗、高容量、低色散的单模光纤在通信干线中占绝对的主导地位,中继站距离可达100~200km,高效率、低噪声的光放大器可使最大无电中继距离达500~600km。各种色散补偿装置增加了色散受限系统的色散容限。传输系统从准同步数字系列(Plesiochronous Digital Hierarchy, PDH)过渡到同步数字传输体制(Synchronous Digital Hierarchy, SDH),SDH体制下电路等级从STM-1发展到STM-64,密集波分(Wavelength Division Multiplexing, DWDM)使一根光纤的容量有上百倍的增加。交换系统的背板容量和吞吐率有上百倍的提高,骨干路由器和交换机提供多个吉比特接口。有线通信理论蓬勃发展,无线通信的发展则更是经历了数代的变革。

第一代(1G)无域通信系统以模拟蜂窝网为主要特征。20世纪70年代末,伴随半导体技术和微处理器的发展,复杂系统的构建逐步成为可能,于是诞生了第一代移动通信系统。它主要采用频分多址(Frequency Division Multiple Access, FDMA)方式实现对用户的动态寻址,使用模拟调制方式完成空域传输。美国推出的高级移动电话系统(Advanced Mobile Phone System, AMPS),欧洲推出的全入网通信系统(Total Access Communication System, TACS)均是这一阶段的产物。

第二代(2G)无线通信系统以数字式蜂窝为主要特征,于20世纪90年代初走向商用。欧洲主推的时分多址(Time Division Multiple Access, TDMA)的GSM和北美主推的码分多址(Code Division Multiple Access, CDMA)的IS-95系统均以数字化为基础。分别使用TDMA和CDMA方式实现对用户的动态寻址,并采用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),采用功率控制技术抵抗慢衰落和远近效应,使用自适应均衡和Rake接收机对抗频率选择性衰落与多径干扰,采用信道交织编码和空间或极化分集分别对抗事件和空间选择性衰落。与此同时,无线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、以IEEE 802.11系列标准为典型代表的无线局域网(Wireless Local Area Networks, WLAN)和以蓝牙(Bluetooth)技术为典型代表的无线个域网(Wireless Personal Area Network, WPAN)。

第三代(3G)无域通信系统以多媒体业务为主要特征,于21世纪初刚刚投入商业运营。3G无线网络可以分为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CDMA 2000和WiMax TDD,欧洲与日本主推的WCDMA以及我国自主研发的TD-SCDMA系统,都以CDMA实现对用户的动态寻址功能,以2G为基础,用户业务的多样性,即多媒体性凸显。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)为代表的无线城域网技术,成为有线接入和3G蜂窝网强有力的竞争对手。

第四代(4G)无线通信系统以宽带高速数据传输为主要特征,目前在IMT-Advanced框架下进行标准化。在4G系统中,除了业务多样性的进一步增强外,还增加了多个无线接入网互操作和网络跨层优化的新需求。全面引入了正交频分多址(Orthogonal Frequency Division Multiple Access, OFDMA)技术,多天线(Multiple-Input Multiple-Output, MIMO)技术,自适应调制编码(Adaptive Modulation and Coding, AMC)和混合自动重传(Hybrid Automatic Repeat Request, HARQ)。目前,世界各国均已展开对下一代移动通信系统(B3G/4G)的研究与开发,以期达到理想的通信目标,并取得了一定的阶段性成果。日本NTT DOCOMO公司、韩国电子通信研究所(ETRI)都已进行了野外测试,推出来一系列高速的试验系统。我

国面向 B3G 的 FuTURE 计划于 2001 年启动，并于 2006 年 12 月在上海进行了系统测试和验收，验收结果表明该系统已达到了国际领先水平。2009 年底，吉比特系统验收的成功标志着我国在无线通信系统领域的国际领先地位。图 1-4 为无线通信系统的演进示意图。

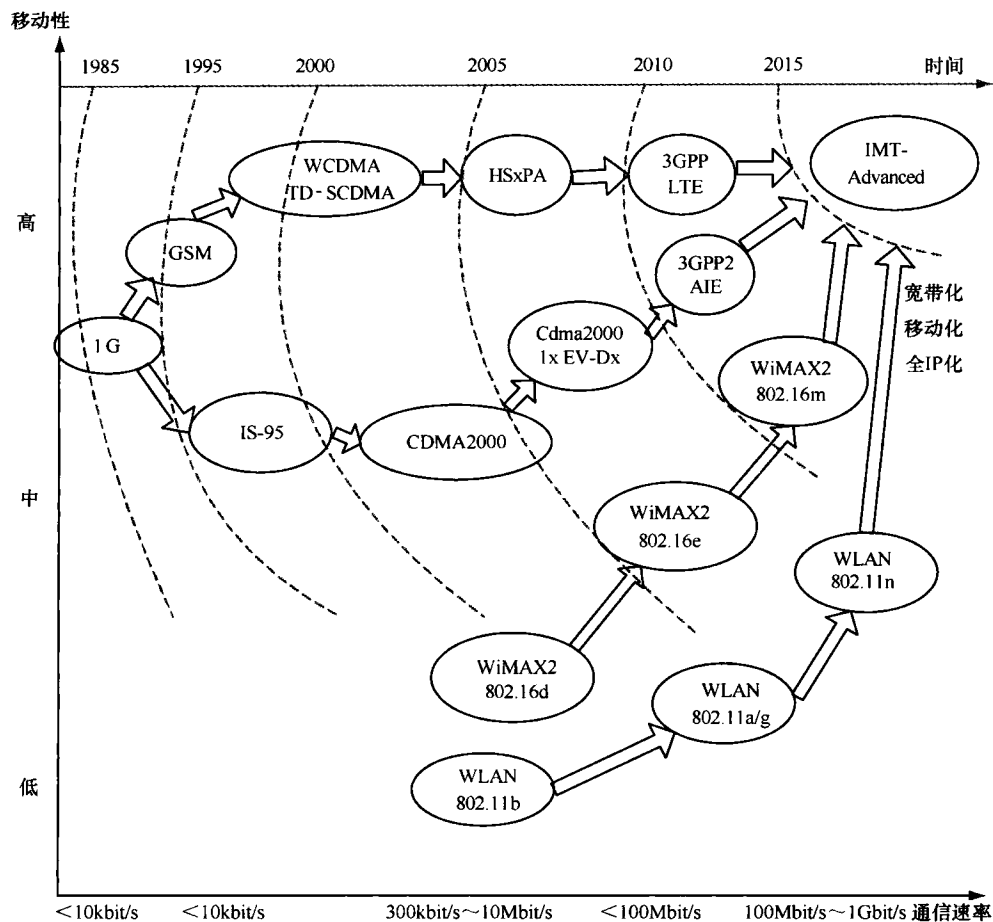


图 1-4 无线通信系统演进示意图

2. 通信系统的特点

通信分为有线通信和无线通信，最早的通信都是有线通信，是传统的固定式通信，即终端固定，线路采用全封闭的传输线，如金属导线、光纤、光缆等，网络也是与之相适应的有线交换网络。其最大的特点是静态，虽然其传输容量、质量都随着时代进步而不断提高，到达了一个非常好的程度，但是它缺乏动态性，不能够满足人们快速移动地进行通信的需求。例如，在一个普通有线长途电话系统中，系统的收发端固定，电话机完成话音信号与音频电信号之间的转换，载波机完成音频信号与高频电信号之间的转换，两地的载波机之间用电缆相连。而无线通信则不需要受空间的限制，不需要架设导线，而是利用无线电波在空间来传递消息。在移动电话系统中，各基站与移动交换局用有线或无线相连，各基站与移动电话之间用无线方式进行通信联络。移动电话把电话信号转换成相应的高频电磁波，通过天线发往基站。同理，也通过天线将信号发往移动电话，最终实现移动电话与其他电话之间的通信。

为了实现消息的传递,无论是有线通信还是无线通信,都需要一定的技术设备和传输设备。这些完成通信所需的一切技术设备和传输媒介所构成的总体称为通信系统。通信系统的一般模型如图1-5所示。

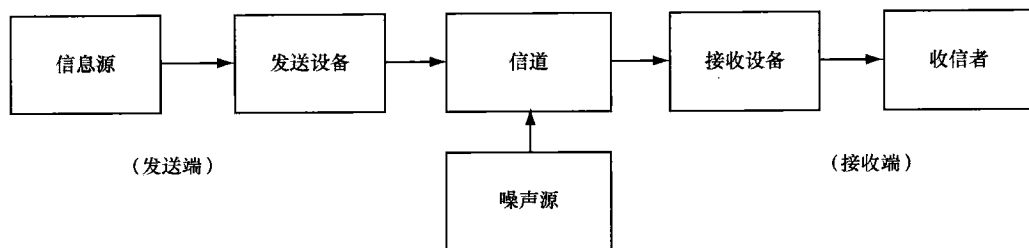


图 1-5 通信系统的一般模型

图 1-5 中所示的信息源即是原始信号的来源,它的作用是将原始信号转化为电信号,常用的信息源是电话机的话筒、摄像机、传真等。为了传输电信号,发送设备需将电信号进行调制、放大、滤波等各种处理和变换,使它适合在信道中传输。在信道传输的过程中有噪声的干扰,所以在接收端,接收设备的功能与发送设备相反,其作用是对接收信号进行必要的处理和变化,消除噪声干扰的影响,以便恢复出相应的原始电信号。受信者的作用是将恢复出来的原始电信号转换成相应的信息,如电话机的听筒将音频电信号转化成声音,提供给最终的消息接收对象。

3. 通信系统的发展趋势

随着通信技术的不断发展,光纤通信、卫星通信、数字微波通信、宽带综合业务数字等现代通信方式的不断涌现,再考虑到市场需求的导向作用,未来通信系统的发展将具备以下特点。

(1) 数字化:随着数据网的速率越来越高、传输质量的提高、误码率的减少,网的规程已大大简化,出现帧中继方式。另外,随着美国的 Internet 计算机通信网向国际发展,传输控制/网络互连协议(Transmission Control Protocol/Internet Protocol, TCP/IP)的应用范围越来越广,各种服务器、连接器也层出不穷,被大量应用。

(2) 综合化:为了克服每种业务(电报、电话、数据、图像)建立单独网的缺陷,更好地满足用户多种业务的需要,通信网在向综合业务网发展。目前,以两个话路带宽加一个信令通道为单元的宽带综合业务网已在使用,在发达国家已达到电话用户的1%~5%。宽带网正在大力开发中。而由于综合业务,尤其是宽带业务的发展,用户接入就成为突出的问题。概念上已从用户线发展为接入网,目前已开始有采用原电话对称铜线提高使用频率,原电缆电视的同轴线与光纤混合,使用全光纤、无线接入等多种方式。这是一个正在蓬勃发展的领域。

(3) 融合化:技术融合也是现在通信技术的显著特点。通信技术与计算机技术和电视技术三者正在互相渗透、互相作用,逐步走向综合与融合。这种综合与融合的结果,将形成以智能多媒体信息服务为特征的天地一体的大规模智能信息网络。正是这种网络,作为一种最先进的生产工具,将改变人们的生产方式、工作方式、学习方式、决策方式、合作方式、娱乐方式、生活方式以至思维方式,从而导致一场巨大的前所未见的社会革命。人类从自然界获得信息靠的是视觉、听觉、触觉、嗅觉、味觉,而当前的通信系统只能满足人们的视听感觉。

未来市场的需求必定会对计算机信息系统提出更高的要求,要求它提供的信息更接近于自然信息源。虽然视听感觉已占了人类获取信息量的 90%,但更加全面、更加逼真的信息交流始终是人类追求的更高目标。因此,未来通信的信息将是包含视觉、听觉、触觉、嗅觉在内的立体信息。

(4) 宽带化:宽带技术是除了电话、传真、遥测、遥控等业务以外的宽带综合业务数字网技术。利用该技术,可以提供高速数据传输、高速文件传输、可视电话、会议电话、可视图文、高清晰度电视以及多媒体、多功能终端等新业务。同时,随着 CPU 的运行速度、交换设备的信息转换速度、信源的编解码速度、信道传输速度以及信道容量的提高,通信系统的实时性将得到极大提高。诸如目前可视电话、WWW 等服务项目中的静态图像传送,将来很可能被实时动态图像传输所代替。

(5) 智能化:随着通信接续的自动化,原来由话务员、报务员操作的功能已转由用户自己来操作。同时,通信的使用越来越复杂,随着技术的发展通信网可提供更多的功能。因此,把由用户来判断、操作的相当部分功能交给通信网来进行,从而使通信网具有人工智能,这是通信发展的智能化方向。通信技术的智能化使通信网能迅速、经济地向用户提供所需要的各类电信新业务,使用户对通信网络有更多更强的控制功能和更大的灵活性。它将改变传统的网络结构,提供大量的电信新业务,如转移呼叫、电话卡、语言信箱等业务,可选记账业务、虚拟专用网业务、通用号码业务、个人号码业务、移动电话漫游业务等,随着需求和技术的发展还将有更多的智能业务被开发。

(6) 个人化:随着人的流动性增加,移动通信使用越来越广泛,技术发展也非常快,从无绳电话、寻呼到蜂窝式移动电话。通信的个人化业务把通信从“服务到家庭”推向“服务到个人”,做到任何人可在任何时间、任何地方与其他任何人进行各种业务(语音、数据、视频等)的通信。一个人在任何地方均可以用一号码实现主叫和被叫通信,这样号码就不是分配给固定地点的固定终端,而是分配给特定的人。为了实现更大的覆盖,除了地面手段外,卫星移动通信正在取得进展。在业务上除了移动电话外,移动数据通信发展也很快。目前,个人通信的一些核心技术,如数字蜂窝状移动通信、公用无线电话系统、无线传呼系统、“铱”低轨道移动卫星通信系统等,都已经取得了显著的突破并进入实用和普及阶段。

1.2 可编程逻辑器件发展概况

当今社会是数字集成电路广泛应用的社会。集成电路的发展大大促进了 EDA 的发展。数字集成电路本身在不断地进行更新换代。它由早期的电子管、晶体管、小中规模集成电路,发展到超大规模集成电路(几万门以上)以及许多具有特定功能的专用集成电路。随着微电子技术的发展,专用集成电路(Application Specific IC, ASIC)的设计与制造已不完全由半导体厂商来独立承担。系统设计师们更愿意自己在实验室里设计实现各种复杂的数字电路芯片,并且立即投入实际应用之中。

目前,数字集成电路分为可编程和不可编程两种。其中,不可编程集成电路的设计可分为全定制设计或基于标准单元的设计和半定制设计或基于标准门阵列的设计。这些设计可以更好地实现电路性能的优化。但是在设计过程中,需要投入大量的成本和时间。一旦产品检验不合格,则已经投入的成本作废,需要从头再来。因此,可编程逻辑器件(Programmable Logic Device, PLD)应运而生。

可编程器件设计基本不考虑布局布线问题,设计成本低。可编程器件的编程工艺可反复擦写,不需要付出硬件代价,设计风险低。它既具有硬件电路的工作速度又具有软件可编程的灵活性,优势非常明显。

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,是目前数字系统设计的主要硬件基础。早期的可编程逻辑器件只有可编程只读存储器(Programmable Read-Only Memory, PROM)、紫外线可擦除只读存储器(Erasable Programmable Read-Only Memory, EPROM)和电可擦除只读存储器(Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory, EEPROM)3种。由于结构的限制,它们只能完成简单的数字逻辑功能。

其后,出现了一类结构上稍复杂的可编程芯片,即可编程逻辑器件(Programmable Logic Device, PLD),它能够完成各种数字逻辑功能。典型的PLD由一个“与”门和一个“或”门阵列组成,而任意一个组合逻辑都可以用“与-或”表达式来描述,所以,PLD能以乘积和的形式完成大量的组合逻辑功能。这一阶段的产品主要有可编程阵列逻辑(Programmable Logic Array, PAL)和通用阵列逻辑(Generic Array Logic, GAL)。PAL由一个可编程的“与”平面和一个固定的“或”平面构成,或门的输出可以通过触发器有选择地被置为寄存状态。PAL器件是现场可编程的,它的实现工艺有反熔丝技术、EPROM技术和EEPROM技术。还有一类结构更为灵活的逻辑器件是可编程逻辑阵列(Programmable Logic Array, PLA),它也由一个“与”平面和一个“或”平面构成,但是这两个平面的连接关系是可编程的。PLA器件既有现场可编程的,也有掩膜可编程的。在PAL的基础上,又发展了通用阵列逻辑(Generic Array Logic, GAL),如GAL16V8, GAL22V10等。它采用了EEPROM工艺,实现了电可擦除、电可改写,其输出结构是可编程的逻辑宏单元,因而它的设计具有很强的灵活性,至今仍有许多人使用。这些早期的PLD器件的一个共同特点是可以实现速度特性较好的逻辑功能,但其过于简单的结构也使它们只能实现规模较小的电路。

为了弥补这一缺陷,20世纪80年代中期Altera和Xilinx分别推出了类似于PAL结构的扩展型复杂可编程逻辑器件(Complex Programmable Logic Device, CPLD)和与标准门阵列类似的FPGA,它们都具有体系结构和逻辑单元灵活、集成度高以及适用范围宽等特点。这两种器件兼容了PLD和通用门阵列的优点,可实现较大规模的电路,编程也很灵活。与门阵列与其他ASIC相比,又具有设计开发周期短、设计制造成本低、开发工具先进、标准产品无需测试、质量稳定以及可实时在线检验等优点,因此被广泛应用于产品的原型设计和产品生产(一般在10000件以下)中。几乎所有应用门阵列、PLD和中小规模通用数字集成电路的场合均可应用FPGA和CPLD器件。

经过了十几年的发展,目前世界上有十几家生产CPLD/FPGA的公司,最大的3家是Altera、Xilinx、Lattice。根据半导体市场调查公司iSuppli的数据,2005年Xilinx和Altera合起来在PLD市场占83.4%的份额。

Altera: 该公司20世纪90年代以后发展很快,是最大可编程逻辑器件供应商之一。主要产品有MAX3000/7000、FLEX10K、APEX20K、ACEX1K、Stratix、Cyclone等,开发软件为QuartusII。

Xilinx: FPGA的发明者,老牌FPGA公司,是最大可编程逻辑器件供应商之一。产品种类较全,主要有XC9500、Coolrunner、Spartan、Virtex等,开发软件为ISE。1985年,Xilinx公司推出了世界上第一款FPGA。Xilinx的客户可以对产品的特性和功能进行快速修改或是升级,以适合新标准和针对某个专门领域重新配置硬件。此项快速技术加快了产品面市时间,实现了产品差异化,并且削减了成本。1998年,Xilinx通过发布Spartan系列引发了低成本