



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

数字信号处理器 技术原理与开发应用

第二版

王军宁 何迪 田阡 杨元挺 党英 编著



高等教育出版社

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

数字信号处理器技术原理 与开发应用

Shuzi XinhaoChuliqi Jishu Yuanli yu Kaifa Yingyong
第二版

王军宁 何迪 田阒 杨元挺 党英 编著



高等教育出版社·北京
HIGHER EDUCATION PRESS BEIJING

内容提要

本书系普通高等教育“十一五”国家级规划教材,以广为应用的美国德州仪器(TI)公司TMS320C54x DSP为典型代表,并结合最新DSP器件和系统开发技术,介绍数字信号处理器(DSP)技术的基本概念、结构、实现、器件开发及系统开发方法。全书共分十章,第一章介绍了数字信号处理器技术的发展和特点。第二章介绍了当今各种不同的DSP器件结构和指标。第三章详细描述了C54x DSP的硬件结构和编程模型及与高速DSP的结构差异。第四章全面介绍了DSP指令及编程优化。第五章介绍了DSP各种开发工具及使用。第六章是TI DSP可视化集成开发环境CCS的介绍与使用。第七章介绍了TI DSP/BIOS的开发方法及使用。第八章是数字信号处理器软硬件设计与应用举例。第九章是现代数字信号处理技术系统开发方法与原理介绍(MATLAB/Simulink、CCS Link、DSP Builder、SOPC Builder等)。第十章是数字信号处理器技术开发与原理实验。

全书以DSP技术开发和系统开发为基础,结合当今嵌入式系统技术和计算机技术,注重与电子信息类专业基础课程的联系,讲述DSP的结构、特点、技术原理及系统开发。可作为大学本、专科生学习及实验、创新及工程设计之用,对于研究生及有关DSP技术开发人员也是十分有用的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理器技术原理与开发应用 / 王军宁等编
著. —2版. —北京:高等教育出版社, 2010.3
ISBN 978-7-04-028600-7

I. ①数… II. ①王… III. ①数字信号发生器-高等学校-教材 IV. ①TN911.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第021220号

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街4号
邮政编码 100120
总 机 010-58581000
经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京奥鑫印刷厂

购书热线 010-58581118
咨询电话 400-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landracom.com>
<http://www.landracom.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

开 本 787×1092 1/16
印 张 28
字 数 690 000

版 次 2003年12月第1版
2010年3月2版
印 次 2010年3月第1次印刷
定 价 38.70元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 28600-00

第二版前言

随着信息化、网络化、多媒体自动化时代的到来,集成电路技术的巨大进步和计算机技术的发展使 DSP 技术在近十几年里得到了巨大的发展和应用。尤其是近年来多媒体移动通信技术和嵌入式系统的广泛应用,FPGA/CPLD 可编程逻辑门阵列和 SOC 片上集成系统的发展,使数字信号处理器 DSP 的速度更快、性价比更高,出现了许多针对多媒体、网络和通信应用的新型 DSP 器件。在 DSP 应用市场的快速变化和系统设计需求下,DSP 在开发技术上,不仅传统的开发工具及开发环境得到了极大的改善和提高,而且现代 DSP 的系统开发方法,从上层理论仿真到底层工程实现,也得到越来越多的重视和开拓。DSP 的系统开发方法越来越趋于完善:从系统级仿真(MATLAB/Simulink)到具体器件实现(DSP、FPGA)的跨度和距离越来越小。同时嵌入式大规模并行实时信号处理的设计与实现在新的 DSP 系统和通信体制中(3G、4G 甚至 5G)得到广泛应用。DSP 系统的数字设计也主要由 DSP 和 FPGA 构成和实现。

本书就是在上述 DSP 技术与应用发展的新背景下,对第一版的《数字信号处理器技术原理与开发应用》做进一步的修订、更新和增删,以适应数字信号处理新技术的发展和需求。

为了便于理解和阅读,本次修订调整、增删及合并了原书部分章节的结构和内容;对 DSP 技术的新发展、新器件及结构做了进一步的介绍,特别是对现代 DSP 的系统开发方法做了较为详细的系统介绍。修订中注重 DSP 应用系统研发所需要的系统开发和综合设计的能力和方法,为 DSP 高级设计人才的培养提供基础和帮助。

全书改编的主要部分是:

1. 为了更加便于阅读和理解,将原书的第四、五、六、七章内容重新编写合并为第四、五、六章,并将原书第九章的前 3 小节内容合并到第四章中。

2. 原书的第三章重新进行了编写,对章节组织和结构做了调整,增加了 DSP 外围设备的详细介绍及 C54x DSP 与现代高速 C6000 DSP 结构的对比。因为这两类 DSP 结构差异较大,使读者不仅清楚常用 DSP 和实验所需的 C54x DSP 的结构,而且可以对比学习最新高速 DSP 的结构和组织。

3. 原书的第八章重新编写后变为第七章。这部分内容是参考我们 2007 年 4 月在清华大学出版社出版的《TI DSP/BIOS 用户手册与驱动开发》编写的。进一步提高了 DSP/BIOS 知识的系统性和易读性。

4. 第九章内容全为新编,从现代 DSP 系统开发的角度介绍了 MATLAB/Simulink 的 DSP 开发方法(系统开发:系统理论算法仿真到 DSP 具体实现);FPGA 的 DSP 开发方法(嵌入式/实时性开发:从 MATLAB/Simulink 到 FPGA 具体实现、FPGA 的 DSP IP 核设计和 FPGA 的 SOPC Builder 片上可编程系统实现);DSP 外围模拟设计方法,使读者了解和掌握 DSP 应用系统完整设计所需要的基本知识和综合应用能力。

全书修订后共分十章,第一章介绍了数字信号处理器技术的发展、特点、创新之处和应用开

发。第二章介绍了 DSP 技术指标和当今各种不同的 DSP 器件结构和组织,使读者能够从中掌握 DSP 发展脉络和结构特点。第三章详细描述了 C54x DSP 的硬件结构和编程模型,并对比介绍了与 TMS320C6000 高速 DSP 的结构差异。第四章以 C54x DSP 为例介绍了数字信号处理器指令及编程,包括汇编语言、寻址方式、指令和伪指令、DSP C 与汇编的混合编程和优化。第五章主要介绍 DSP 各种开发工具及使用。包括 DSP 开发流程、开发工具、目标格式、C 编译器、汇编器、链接器及链接命令文件、其他实用程序。第六章是 TI DSP 处理器的可视化集成开发环境 CCS 的介绍与使用。第七章介绍了 TI DSP/BIOS 的基本概念、开发方法及使用编程。第八章是数字信号处理器硬软件设计与应用举例,讨论了硬件设计和软件设计基本方法及应用。第九章是现代数字信号处理技术系统开发方法和原理介绍,介绍了从算法理论研究、仿真到 DSP 具体实现的 MATLAB/Simulink 与 CCS Link; DSP 并行实时实现的 FPGA 设计方法,包括 IP 核设计、DSP Builder 设计和 SOPC Builder 设计; DSP 应用系统的外围模拟电路设计要点及概念。第十章是数字信号处理器技术开发与原理实验,以 TMS320C5402 DSK 板为实验器材,可供学习之后的原理验证、实习上机、应用参考之用。

全书由王军宁担任主编并对全书统稿与审阅,同时修订编写了第一、八、九章;何迪重新编写了第三、七章;田阆修订编写了第四、五、六章和第九章部分。杨元挺修订编写了第二章和附录部分,党英编写第十章和第六章部分,荣瓴参与了本书初稿和全部校订工作。

编写修订过程中参考引用了同行的许多工作及见解;研究生吴伟、张永晓、秦建国、曹景致等为本书的编写做了许多工作,在此一并表示谢意。

全书由西安交通大学电子与信息工程学院张太镒教授审阅,张教授对本书的鼓励及对编写修订工作提出的许多宝贵建议,让我们受益匪浅;在编写修订过程中还得到美国德州仪器公司上海分公司亚太区大学部的技术支持和指导;在此一并表示深深的敬意和感谢。

由于 DSP 技术发展快,涉及面广,以及编者的水平有限,书中难免有不当和歧错之处,敬请广大读者批评指教,以便在今后的再版中修订和改正。

编 者

2009 年 8 月于西安电子科技大学

第一版前言

数字信号处理是当代发展最快的信息学科之一,尤其是在 20 世纪末年,由于数字信号处理理论的逐步成熟和研究内容的日益广泛、超大规模集成电路技术和计算机技术的高速发展,特别是网络化和数字化信息市场的巨大需求,使得数字信号处理理论及其工程实现得到了广泛的应用,而工程实现的关键技术之一就是数字信号处理器技术。数字信号处理器的使用遍及通信、雷达、声呐、生物医学、机器人、语音和图像处理、虚拟现实、自动控制等领域。在未来的数字化发展中,数字信号处理器也将以其独特的数字信号处理优势得到更加广泛的应用和普及。

在数字信号处理器的全球企业中,美国德州仪器(TI)公司是数字信号处理器发明的鼻祖(1981 年),多年来一直占据较大的 DSP 市场份额。1999 年约占全球 DSP 市场的 49%。TI 公司的 TMS320 系列 DSP 一直是全球广泛使用的数字信号处理器之一。本书以美国德州仪器公司的数字信号处理器 TMS320C54x DSP 为代表,介绍数字信号处理器技术的基本概念、结构、实现及使用开发方法。

全书共分十章。第一章为综述,详细介绍了数字信号处理器技术的发展、特点和种类。使读者能从中把握 DSP 技术的特点和概貌,了解 DSP 和数字信号处理理论的关系及发展。第二章介绍了 DSP 的主要性能指标和当今各种不同的数字信号处理器硬件结构及组成,可从中了解 DSP 技术及实现的一般规律和构成。第三章详细描述了 TMS320C54x DSP 的硬件结构和编程模型,这是 DSP 应用编程的基础。

本书第四章介绍了 TMS320C54x 数字信号处理器的指令及使用。包括寻址方式、汇编语言指令和伪指令系统。第五章主要介绍 C54x DSP 程序设计工具及使用,包括汇编器、链接器、目标段的定位与下载等内容。第六章是 DSP 处理器的开发工具及使用环境,主要介绍了 TMS320 DSP 系列的主要硬软件调试工具,如 DSK 板、EVM 板、在线仿真器 XDS510 及可视化集成开发环境 CCS 的使用。

由于 C 语言编程在 DSP 程序设计中的使用日益广泛,本书在第七章中介绍了 C54x DSP C 编译优化器的使用及 C 和汇编混合编程的方法。第八章是以 TI DSP/BIOS 为内容,介绍了 DSP/BIOS 作为嵌入式系统软件应用的开发方法。

第九章是数字信号处理器硬软件设计及综合应用。讨论了 DSP 软件设计和硬件设计的方法及开发应用方案和举例。通过本章内容的学习,读者可进一步掌握 DSP 系统设计方法,并且了解到数字信号处理技术应用的广泛性和趣味性。在本章的 DSP 应用举例中,加入了 LMS 自适应滤波器系统的分析与应用,虽然这一内容已超出了本科教学内容要求,但作为数字信号处理系统的典型应用和系统分析、设计、仿真和实现的例子,激励读者进一步学习还是很有意义的,可以选用。在这一章的最后,介绍了有关全球 DSP 设计竞赛的信息,旨在鼓励读者特别是在校大学生勇于实践,积极挑战自我,努力培养工程实践应用和创新能力。第十章是数字信号处理技术开发与原理实验指导。以 TMS320C5402 DSK 板为主要实验器材,内容包括: DSP 技术基础实验、数

字信号处理基本原理实验、数字信号处理技术应用综合实验。可供学习之后的原理验证、实习上机、概念巩固、应用参考之用。

书末附录中有 C54x DSP 指令系统列表和部分指令介绍、实验中用到的部分参考程序、DSP C 编译器内联函数表及 C54x 中断向量表。这些都是学习当中可参考使用的,其中部分指令介绍主要是为了使读者了解书中未讲到的指令和它们的格式、功能及使用,进而通过上机就很容易理解指令系统列表中的其他指令的使用方法。

本书以 TI 公司的 TMS320 系列 DSP 为例,介绍 DSP 技术与应用。而其他公司的 DSP 芯片在结构、开发工具和开发环境上虽各有不同,但概念上是相通的。在 TMS320 系列 DSP 中,本书又以 C54x DSP 为例介绍,因为 C54x DSP 是目前比较流行的 DSP 芯片之一。它的结构,使用的开发工具和环境同 TI DSP 其他系列芯片有许多类似之处,除指令有一定的差异外,特别是开发工具和环境的基本一致,使读者通过本书的学习,可以举一反三,易于了解和掌握其他 TI 系列 DSP 或其他公司的 DSP。本书可供大学本、专科生使用,也可供研究生及有关 DSP 技术开发人员参考。

全书由王军宁主编。王军宁编写第一、三、四、五、九章。吴成柯编写了第六章并承担前期书稿的审阅工作。党英编写第七章和第十章主要部分。第二、八章由柯元旦和王军宁共同编写,孙波同志对全书主要内容及图表进行了整理和校订,荣钰同志参与了书稿的录入和校订工作。

本书编写过程中得到了国家电工电子教学基地和孙肖子教授、高西全教授的帮助和支持。李安新、史海洋、黄河、李波等同学为本书的程序设计和编写做了许多工作。美国德州仪器公司中国分公司大学部为实验室的建立和运行提供了技术和设备上的帮助和支持。在编写过程中参考和借鉴了同仁的许多工作,还得到了其他许多同志和同学的帮助和支持,由于不能一一列举,在此一并表示衷心的感谢。

全书以大学本科所学课程数字信号处理和微机原理为基础,结合当今嵌入式系统和计算机技术,讲述 DSP 构成、技术原理与应用。编写中,尽管作者力求内容新颖、衔接得当、概念清楚、技术先进。但由于编者掌握的资料和水平有限,特别是 DSP 技术的快速发展和变化,使 DSP 的教学内容一直在不断改进,也使编者感到有许多需要学习的地方。书中的不足之处和错误在所难免,恳请读者批评指正。

全书由西安交通大学张太溢教授审阅,并提出了许多宝贵意见,在编写出版过程中,还得到高等教育出版社编辑们的大力支持和帮助,在此一并表示衷心的感谢。

编 者

2003 年 7 月于西安电子科技大学

目 录

第一章 数字信号处理器技术综述	1
1.1 什么是数字信号处理、DSP 技术和实时实现	1
1.2 数字信号处理器技术的发展及现状	2
1.2.1 数字信号处理理论和实现技术的发展	2
1.2.2 数字信号处理器技术发展现状	4
1.3 数字信号处理技术的应用	7
1.4 数字信号处理器技术特点及其与通用计算机、单片机的区别	10
1.5 数字信号处理器技术实现的结构和特点	14
1.5.1 处理器实现的两种结构	14
1.5.2 处理器的多总线和流水线	15
1.5.3 处理器的主频和并行技术	15
1.5.4 数字信号处理器技术并行结构实现的分类	16
1.5.5 阵列处理器	17
1.6 数字信号处理器开发工具	20
1.7 数字信号处理技术开发实现方法	22
小结	24
习题与思考题	25
第二章 现代数字信号处理器介绍	26
2.1 DSP 技术指标和分类	26
2.2 专用数字信号处理器 DSP	28
2.3 通用数字信号处理器 DSP	30
2.3.1 世界第一片商业化通用数字信号处理器 TMS320C10	31
2.3.2 DSP16xx 系列	32
2.3.3 ADSP 21060 DSP	32
2.3.4 TMS320C6201 高速 DSP	35
2.3.5 TMS320C6455 超高速定点 DSP	36
2.3.6 面向电信基础应用的 TMS320TCI6486 多核 DSP	37
2.3.7 TMS320C28x 控制 DSP	39
2.3.8 TMS320C5000 DSP+RISC	40
2.3.9 TMS320C55x 低功耗 DSP	41
2.3.10 OMAP5910 处理器	43
小结	45
习题与思考题	45
第三章 C54x 数字信号处理器结构	47
3.1 结构概述	47
3.2 总线结构	48
3.3 CPU 内核	50
3.4 指令流水线	51
3.5 存储器组织结构	52
3.5.1 程序空间	54
3.5.2 数据空间	56
3.5.3 CPU 寄存器	56
3.6 系统控制	59
3.6.1 数据地址及程序地址生成	59
3.6.2 系统复位	60
3.6.3 中断系统	61
3.6.4 节电模式	64
3.7 片上外设	65
3.7.1 通用 I/O 引脚	66
3.7.2 定时器	66
3.7.3 时钟发生器	67
3.7.4 多通道缓冲串口 (McBSP)	70
3.7.5 DMA 控制器	76
3.7.6 外部总线接口	78
3.7.7 主机接口 (HPI)	82
3.8 JTAG 边界扫描逻辑 (IEEE 1149.1 标准)	86

3.9 C54x DSP 芯片引脚及功能	87
3.10 现代高性能 DSP 与 C54x DSP 的对比 ..	92
3.10.1 VLIW 结构下的总线、CPU 与 指令流水线	92
3.10.2 存储器结构(blocks 与 banks)	94
3.10.3 外部存储器接口(EMIF)	94
小结	96
习题与思考题	97

第四章 C54x 数字信号处理器程序

设计开发基础	98
4.1 C54x DSP 汇编程序设计基础	98
4.1.1 汇编程序语句基本结构	98
4.1.2 汇编语言数据类型	101
4.1.3 表达式	103
4.2 数据寻址方式	104
4.2.1 立即数寻址	104
4.2.2 绝对寻址	105
4.2.3 累加器寻址	106
4.2.4 直接寻址	106
4.2.5 间接寻址	107
4.2.6 存储器映射寄存器寻址	113
4.2.7 堆栈寻址	113
4.3 汇编语言指令系统	114
4.3.1 算术指令	117
4.3.2 逻辑指令	122
4.3.3 程序控制指令	122
4.3.4 装入和存储指令	127
4.4 汇编伪指令	128
4.4.1 段定义伪指令	128
4.4.2 初始化常数伪指令	131
4.4.3 段程序计数器定位伪指令	136
4.4.4 输出列表格式伪指令	136
4.4.5 文件引用伪指令	137
4.4.6 条件汇编伪指令	137
4.4.7 符号定义伪指令	137
4.4.8 其他方面的汇编伪指令	138
4.4.9 C54x 汇编伪指令列表	139

4.5 C54x DSP C 程序开发基础	141
4.5.1 C54x DSP C 语言特点	141
4.5.2 C54x C 程序数据类型	142
4.5.3 关键字	142
4.5.4 寄存器变量	145
4.5.5 asm 语句	145
4.5.6 pragma 伪指令	146
4.5.7 初始化静态和全局变量	148
4.6 C54xDSP C 与汇编混合编程	148
4.6.1 独立的 DSP C 和汇编接口	149
4.6.2 DSP C 程序中访问汇编变量和 常量	151
4.6.3 DSP C 程序中直接嵌套汇编 语句	154
4.6.4 利用 DSP C 编译器的内联 (intrinsics)函数访问汇编 语句	155
4.7 C54x DSP C 程序的优化	156
4.7.1 C54x C 优化编译器	156
4.7.2 优化特性	157
4.7.3 C54x DSP C 程序优化选项	158
4.7.4 C 与汇编语言混合编程优化 考虑	163
小结	163
习题与思考题	163

第五章 C54x 数字信号处理器开发

工具	165
5.1 数字信号处理器软件开发环境及 流程	165
5.2 TI DSP 系统调试和评估工具	167
5.2.1 DSP 入门套件(学习板)DSK	167
5.2.2 TMS320 DSP 评估模块(板) EVM	169
5.2.3 TMS320 DSP 在线仿真器 XDS 和 Emulator	170
5.2.4 软件仿真器(Simulator)	172
5.2.5 TMS320 DSP 调试程序(C Source Debugger)	172

5.3 公用目标文件格式(COFF)介绍	172	6.5.2 设置测试点	202
5.3.1 COFF 文件中的段	173	6.6 代码性能测试(profiling)	203
5.3.2 段程序计数器	174	6.7 仿真中断与 I/O 端口	204
5.3.3 COFF 文件中的符号	174	6.7.1 用 simulator 仿真中断	204
5.4 C54x DSP C 编译器(C Compiler)	174	6.7.2 用 simulator 仿真 I/O 口	208
5.4.1 关于 C 编译器	175	6.8 CCS 的 GEL 语言编程	213
5.4.2 调用 C 编译器	176	小结	213
5.5 C54x 汇编器(Assembler)	176	习题与思考题	213
5.5.1 源程序列表文件	177		
5.5.2 汇编器的使用	178	第七章 DSP/BIOS 嵌入式软件开发	215
5.6 C54x 链接器(Linker)	179	7.1 DSP/BIOS 概述	215
5.6.1 链接器的使用	180	7.1.1 多任务应用系统	215
5.6.2 链接器命令文件	182	7.1.2 DSP/BIOS 与操作系统	216
5.6.3 链接器对段的处理	184	7.1.3 CCS 中的 DSP/BIOS 组件	217
5.7 档案管理器(Archiver)	185	7.2 DSP/BIOS 常用模块	222
5.8 绝对列表器	186	7.2.1 概述	222
5.9 交叉引用列表器	187	7.2.2 监测	223
5.10 其他工具	189	7.2.3 线程调度	226
5.10.1 十六进制转换公用程序	189	7.2.4 存储器管理	228
5.10.2 助记符-代数式转换程序	190	7.2.5 数据 I/O	229
小结	190	7.3 DSP/BIOS 软件开发	233
习题与思考题	191	7.3.1 DSP/BIOS 程序开发过程	233
		7.3.2 DSP/BIOS 程序源文件	234
第六章 C54x 处理器可视化集成开发		7.3.3 DSP/BIOS 启动序列	235
环境 CCS	192	7.3.4 DSP/BIOS 软件开发举例	236
6.1 可视化集成开发环境 C54x CCS	193	7.4 RTDX 原理及应用	243
6.2 CCS 软件安装与设置	193	7.4.1 RTDX 原理	243
6.2.1 系统配置	193	7.4.2 RTDX 应用	245
6.2.2 系统安装	194	7.4.3 RTDX 实例	245
6.2.3 CCS 存储器模型设置	195	小结	247
6.3 用 CCS 开发程序的基本过程	196	习题与思考题	247
6.3.1 建立项目(project)文件	197		
6.3.2 编译并运行程序	198	第八章 数字信号处理器软硬件设计与	
6.4 利用图形工具观察数据和图形	199	应用	248
6.4.1 观察数据	199	8.1 C54x 数字信号处理器程序设计	248
6.4.2 观察图形数据	200	8.1.1 循环寻址编程	248
6.4.3 动态显示数据和图形	201	8.1.2 DSP 位倒序寻址编程	250
6.5 设置断点和测试点	202	8.1.3 扩展精度运算	253
6.5.1 设置断点	202	8.2 C54x 程序设计举例	255

8.2.1 正弦波产生器	255	9.3.2 运算放大器种类及开发	329
8.2.2 梳状滤波器的实现	258	9.3.3 A/D、D/A 种类及开发	338
8.2.3 快速傅里叶变换 FFT	260	9.3.4 直流稳压电源种类及开发	344
8.3 C54x 数字信号处理器硬件设计	268	9.3.5 其他 DSP 外围器件种类	348
8.3.1 复位及电源管理	268	小结	350
8.3.2 等待状态产生	270	习题与思考题	350
8.3.3 存储空间块切换逻辑	271		
8.3.4 DSP 模拟接口	273		
8.3.5 DSP 与存储器接口	273		
8.3.6 JTAG 在线仿真调试接口设计	274		
8.3.7 DSP 自举引导 BOOT_			
LOADER	276		
8.4 DSP 应用举例	279		
8.4.1 有限冲激响应滤波器 FIR	279		
8.4.2 m 序列发生器	283		
8.4.3 手机信号实时频谱分析	285		
8.4.4 LMS 自适应滤波器系统分析			
与应用	288		
8.5 全球 DSP 设计竞赛	295		
小结	295		
习题与思考题	296		
第九章 现代数字信号处理技术系统			
开发	297		
9.1 数字信号处理系统算法仿真与实现——			
MATLAB/Simulink	297		
9.1.1 MATLAB/Simulink 简介	298		
9.1.2 MATLAB/Simulink 与 DSP	299		
9.1.3 CCS Link 组件功能及特点	301		
9.1.4 利用 MATLAB/Simulink 开发调试			
DSP	304		
9.2 数字信号处理系统算法实现——			
FPGA	312		
9.2.1 FPGA 与 DSP	312		
9.2.2 FPGA 的 DSP 开发方法	315		
9.2.3 具有 DSP 模块的 FPGA 器件	325		
9.3 数字信号处理系统 DSP 外围解决			
方案——TI 模拟器件	327		
9.3.1 DSP 系统设计及外围器件	328		
		第十章 数字信号处理技术开发及	
		原理实验指导	352
		10.1 实验设备及系统构成	352
		10.2 TMS320C5402 DSK 实验板	353
		10.2.1 C5402 DSK 板硬件结构	353
		10.2.2 TLC320 AD50 模数、数模	
		转换器	354
		10.2.3 DSK 实验板开发所需的存储器	
		配置环境	357
		10.3 DSP 技术基础实验	358
		10.3.1 CCS 的使用及 I/O 口和中断	
		仿真	358
		10.3.2 C54x 存储器及 Flash 应用	
		编程	359
		10.3.3 C54x 多通道缓冲串口应用	363
		10.3.4 C54x 定时器实验	366
		10.3.5 C54x 外中断编程	369
		10.3.6 C54x 异步通信接口 UART	
		实验	370
		10.4 数字信号处理基本原理实验	371
		10.4.1 信号时域频域关系及采样	
		定理	372
		10.4.2 快速傅里叶变换 FFT 和信号	
		功率谱分析	377
		10.4.3 FIR 数字滤波器设计与 DSP	
		实现及应用	381
		10.4.4 IIR 数字滤波器设计与 DSP	
		实现及应用	384
		10.4.5 滤波器应用——抑制载波的双边	
		带 AM 调制	386
		10.4.6 采样率转换滤波器实验	387
		10.5 数字信号处理技术应用综合实验	389

10.5.1 抑制载波双边带 AM 调制与解调器的性能评估系统	389	10.5.11 卷积码的编、解码器	394
10.5.2 2DPSK 相位调制与解调器的性能评估系统	390	10.5.12 RS 码的编、解码器	394
10.5.3 数字振荡器	391	10.5.13 RTDX 系统应用	395
10.5.4 音频扰频器与解扰器	391	附录	397
10.5.5 数字录放机	391	附录 A C54x 指令系统列表	397
10.5.6 模拟交通灯 DSP 控制设计	392	附录 B 部分指令介绍	408
10.5.7 模拟电梯自动控制程序	392	附录 C 实验参考程序	425
10.5.8 数字广告大屏幕显示	392	附录 D C54x C 编译器内联函数列表	430
10.5.9 自相关运算在信号提取中的应用——从噪声中提取正弦波信号	393	附录 E C54x 系列 DSP 中断向量表	431
10.5.10 自适应系统识别	393	参考文献	434

第一章

数字信号处理器技术综述

1.1 什么是数字信号处理、DSP 技术和实时实现

数字信号处理就是信号的数字化及数字运算和变换的处理。这方面的研究开始于 20 世纪 60 年代。现在大学阶段学习的数字信号处理课程即讲述信号数字化处理的基本理论、算法和应用。数字信号处理(Digital Signal Processing)又可称为 DSP。由于过去很长时间里受计算机集成电路技术和数字化器件发展水平的限制,数字信号处理理论的实时应用很难实现。数字信号处理的学习和应用只限于理论概念的讲授和仿真,所以国内人们常称为数字信号处理,而较少用 DSP 一词。而最早的通用可编程数字信号处理硬件芯片,英文名就是 Digital Signal Processor(数字信号处理器),有别于 Digital Signal Processing(数字信号处理)。但二者英文简写都为 DSP。

随着数字化硬件技术水平的飞速发展,数字信号处理的理论和方法得以在实际应用中大量实现。DSP 一词逐渐流行起来。人们常用 DSP 一词来指通用数字信号处理器,用数字信号处理来指信号数字化处理的理论及方法,用 DSP 技术来指和数字信号处理器有关的数字信号处理算法实现技术和理论。

数字信号处理算法的实现方法一般分为两种,一种是针对某一具体的数字信号处理算法而采用的专门硬件实现技术和芯片。这类芯片名称一般是按其实现功能而称谓的。例如数字滤波器 TDC1028、矢量处理器 ZR3416 等。它们的名称中较少有“DSP”及“数字信号处理器”字样,但它们也是属于数字信号处理器一类,只不过是针对专门用途而设计的;另一种是针对一般数字信号处理算法的实现而采用的通用可编程序硬件处理器技术和算法。这类芯片的名称中一般都有“DSP”及“数字信号处理器”字样,如:美国 TI 公司的 TMS320C5402 DSP,美国 AD 公司的 ADSP-21020 数字信号处理器,美国 Motorola 公司的 DSP56300 等。这就是通常所说的 DSP(数字信号处理器)。

数字信号处理算法的实现可分为实时实现和非实时实现。“实时”是针对某种处理任务对算法实现时间的具体要求而言的。如果算法的处理时间可以达到这个要求,就认为该算法实现是“实时”的,否则就是非实时的。如 PAL 制电视信号是每秒 50 场,每场 20 ms。如果某电视图像处理算法的实现时间小于 20 ms,那么对要求 20 ms 内完成处理一场图像的设计要求来说,算法实现是实时的,超过 20 ms 处理要求的实现就是非实时的。

在数字信号处理理论发展的早期,由于理论水平的限制和实现技术的落后,许多数字信号处理算法的执行时间是无法达到实时应用要求的。所以算法的实现大都是在计算机上仿真,而后得到处理结果,是非实时的。那时的数字信号处理理论和实际应用研究也都是学者和科研人员的事,与产业界似乎无关。现在由于数字信号处理理论的进步,特别是大规模集成电路技术、计

算机技术和 DSP 技术的发展,使得许多应用实现都可以是“实时”的实现。因而 DSP 技术和“实时实现”也越来越受到人们的关注和渴望,并在产业界得到了大量的支持和应用。



图 1.1.1 DSP 芯片及其在第三代手机和机顶盒上的应用

数字信号处理器的最典型应用就是现在几乎人人都持有的无线通信手机。尤其是第三代多媒体无线通信手机更离不开 DSP 关键技术的支持。现在电子类消费市场上手机市场是最活跃处之一,可见 DSP 应用市场之大。图 1.1.1 是一个 DSP 芯片图及其在第三代移动通信手机和电视机顶盒上的应用。

1.2 数字信号处理器技术的发展及现状

1.2.1 数字信号处理理论和实现技术的发展

数字信号处理是 20 世纪 60 年代前后发展起来的一门新兴学科。在近半个世纪的发展中,数字信号处理技术的发展始终是伴随数字信号处理理论的进步、成熟和集成电路的技术进步而发展起来的。

自 1822 年傅里叶在研究热传播理论时发现傅里叶级数及理论以来的 100 年里,科学家们一直在研究、探索和完善信号处理和数字信号处理的基础理论和应用。在 20 世纪 60 年代初期,数字信号处理的基础理论研究已经比较成熟,各种应用算法研究和算法的快速实现方法是应用研究的重点。如离散信号分析和系统及变换理论、各种 DFT 快速变换算法及理论、数字滤波器分

析与设计方法等。1965 年 Cooler 和 Tukey 发明了快速傅里叶变换算法(FFT),使傅里叶分析的速度提高了数百倍,从而为数字信号处理的应用奠定了基础。但由于当时计算机技术和数字技术发展水平的限制,计算速度不高,数字信号处理理论的实现技术一直处于实验室研究阶段,应用受到限制。20 世纪 60 年代,主要采用计算机模拟仿真的方法研究数字信号处理、变换和数字滤波等问题,往往是花费了很多时间才处理分析了少量的信号,无法像模拟信号系统那样做到实时处理。

20 世纪 70 年代后,由于集成电路技术的发展,使得用硬件实现 FFT 和数字滤波器等算法成为可能。最初只是用多个 IC 芯片实现数字信号处理中的一个基本运算部件,如加法器、乘法器、延迟器等。因此所构成的数字信号处理设备体积比较大。随着 IC 集成度的提高,可以在一个芯片内集成多个运算部件,从而使数字信号处理的应用范围进一步扩大。与此同时,研究人员也将微处理器应用于数字信号处理实现中,实现数字信号处理的可编程和通用性。但由于当时微处理器的运算速度不高,内部结构主要是为通用计算和控制而设计,所以在许多场合都难以实现数字信号的实时处理。

与此同时,数字信号处理理论也在不断地发展。自适应滤波、卡尔曼滤波、同态滤波等理论逐步成熟和应用,实际应用更迫切需要专门的数字信号处理部件来提高信号数字化处理的实时性。

进入 20 世纪 80 年代以来,随着电子计算机、大规模集成电路(LSI)技术的发展,1981 年美国德州仪器公司研制出了第一片商用数字信号处理器 TMS320C10 DSP。以后各种数字信号处理器的出现和不断成熟,首先使得音频范围内的数字信号处理技术得到了广泛的实时应用。当时通用数字信号处理器的内部结构已采用改进的哈佛结构和乘法累加器硬件单元,只是并行处理的能力还比较弱。20 世纪 90 年代以后,由于超大规模集成电路(VLSI)技术,以及微处理器技术和计算机技术的迅猛发展,数字信号处理无论在理论上还是在工程应用中,都是发展最快的学科之一,并且日趋完善和成熟。数字信号处理器内部结构实现了多总线、多功能单元、多 DSP 并行。数字信号处理器除了不断提高自身的运算速度和功能外,还出现了许多工作频率达 20 MHz 以上的专用芯片和部件,从而使数字信号处理技术的应用进入实时处理阶段。用户可以根据要求灵活地选用各种器件构成自己专用或通用的实时数字信号处理系统。

特别是 20 世纪 90 年代中后期,由于 Internet 迅猛发展和高清晰度数字电视的研究及各种网络通信、多媒体技术的普及和应用,极大地刺激了数字信号处理理论尤其是数字信号处理技术在工程上的实现和推广应用。目前数字信号处理器的工作主频已经达到 1.2 GHz、9 600 MIPS(每秒百万条指令)以上,内部并行功能单元已达到 8 个,价格越来越低,功耗越来越小,性价比极高。数字信号处理理论也由经典理论发展到现代信号处理理论。系统方面已从研究简单的线性时不变的最小相位系统,发展为研究非线性时变的非最小相位系统。数字信号处理的新发展,使人们可以有效地分析和处理非高斯信号和非平稳时变的信号。时频分析、现代谱估计、小波变换、模糊逻辑、神经网络、进化计算等理论成为新的研究热点。

高速、实时信号处理是现代信号处理技术发展的一个显著特点,需要极高的数据吞吐率和巨大的实时计算量。这种技术融合了信号处理理论、VLSI 技术和计算机技术。在目前高速 DSP 上实现小波变换和神经网络算法已成为可能。

1.2.2 数字信号处理器技术发展现状

1. 高主频、高精度、高速度运算能力

目前,通用数字信号处理器已经发展到第五代,并且正在向高速度、高精度和大运算量实时处理方向发展。例如 TI 公司的特别长指令字结构(VLIW)数字信号处理器 TMS320C6455 16 位定点 DSP,工作主频达 1.2GHz,9600MIPS 高速运算能力。TMS320C6487 多核 DSP,内有 3 个 1GHz 的 C64x+ DSP 核,总工作主频达 3GHz,数字处理速度 24000 MIPS。美国 Intrinsity 公司的 FastMath DSP mips32 工作主频达到 2GHz。而朗讯公司的 DSP32、TI 公司的 TMS320C6727B 都是 32 位浮点 DSP,其中 TMS320C6727B 工作主频达 350MHz,工作速度峰值达 700 MMACS(每秒百万次乘积累加次数)。AT&T 公司的 DSP16B 的工作时钟频率达 80MHz。美国 AD 公司的 ADSP-21160 是一种超级哈佛结构的浮点计算机,内有 4 组独立的总线,单周期执行指令,工作主频 100MHz。完成 1024 复数点 FFT 的时间为 0.46ms。ADI 公司的 TigerSharc 32 位浮点 DSP,其中 TS201 DSP 工作主频 300MHz,浮点运行速度 900MFLOPS(每秒百万次浮点运算)。Motorola 公司的 MPC7410 DSP,64 位浮点 DSP,工作主频 500MHz,数据处理速度 4000MFLOPS。

2. 高度并行处理及阵列流水线结构

尽管当前的 DSP 技术已达到较高的水平,但在一些实时性要求很高的场合,单片 DSP 的处理能力还是不能满足要求。因此,使用多总线、多流水线和多处理器并行系统就成为提高系统性能的重要途径。许多算法,例如数字滤波、FFT 变换、矩阵运算等,都包含有乘积求和形式的数列,或一种有规则的运算处理。在这种情况下,可以将算法分解为若干级,用串行或并行的方法来加快处理速度。因此,新型 DSP 的发展方向,是在提高单片 DSP 性能的同时,尤其注重在结构设计上为多处理器的并行应用提供方便。例如, TI 公司的 TMS320C6455 DSP,集成了 4 个高速低电压差分数据传输 Rapid IO 通信口,数据传输速度高达 25Gbit/s,既可以做多片 DSP 级联,也可以做多片 DSP 并行连接,构成并行处理。AD 公司的 SHARC 系列 DSP 为满足多片互连的需要,专门设置有 LINK 链路口,可无缝连接多达 6 片 DSP,组成一定拓扑结构的网络。这些都是专门为多处理器应用而设计的。除考虑片外 DSP 之间的连接设计外,另一种方法就是将多片 DSP 内核集成在一个芯片内,如 TI 公司 2009 年初推出的 TMS320TCI6486 DSP,内有 6 个 500MHz 主频、可编程的 TMS320C64x+ DSP 处理器,总计 3GHz 工作主频,执行 24000MIPS,支持各种并行处理。又如 TMS320C5421 DSP 内有两片 C54x CPU 内核和 128K 字的连接缓冲 RAM,指令执行速度达 200MIPS。

在提高 DSP 芯片并行工作的同时,DSP 内部结构上最明显的改进除了多总线结构以外,另一个就在于提高了内部结构单元的“并行性”,即在一个指令周期内,DSP 所能完成操作的数量。一个突出例子是美国德州仪器公司(TI)1997 年推出的带有 8 个功能单元并行,使用超长指令字(Very Long Instruction Word, VLIW)结构的 TMS320C6000 DSP。这种 32 bit 运算 DSP 在每个周期内可以完成 8 个操作,其峰值运算速度达到了每秒执行几十亿条指令(5760 MIPS),如果片外存储器能够支持,DMA 的数据传输能力可以达到每秒 800MByte。

高速实时信号处理系统目前常见的结构大致有四种:流水线处理结构、并行处理结构、阵列结构、RISC(精简指令系统计算机)结构。并行结构如前所述,流水线结构和阵列结构我们在后面会陆续介绍。RISC 结构是相对于复杂指令系统计算机(CISC)而言的。它是从 20 世纪 80 年

代发展起来的新型计算机系统结构形式。RISC 结构的 CPU 简化了指令系统,而且通过指令的简化使 CPU 结构更加紧凑合理,减少了电路面积,从而提高了运算速度,降低了功耗。早期最优秀的 RISC 结构并行处理芯片首推英国 INMOS 公司的 Transputer 微处理器系列。目前应用广泛的典型 RISC 结构的芯片是 ARM 处理器。我们现在广泛使用的奔腾计算机就是在 CISC 结构基础上采用了部分 RISC 技术的产品。

3. 专用 DSP(ASIC)及 FPGA

在通用 DSP 快速发展的同时,专用 DSP 芯片的发展也很快,尤其是 FPGA 的 DSP 实现更是当今 DSP 的研究热点之一。目前可作实时处理的 FIR(有限冲激响应)数字滤波器芯片就有几十种。它们的共同特点是,具有多个乘法累加器构成的独立计算单元,便于级联运算。有的还可以实现自适应 FIR 滤波器或 IIR(无限冲激响应)滤波器。实现 FFT 算法的专用芯片也有多种。例如 A41102、PDSP16510、TMC2310 等。此外,二维数字信号处理(图像处理)芯片也发展得很快,如二维图像/信号处理芯片 A110,LOGIC 公司的 L64240 多比特滤波器等。还有许多在电讯、通信领域里得到广泛应用的调制/解调、复分接等 ASIC 专用 DSP 芯片。

在 DSP 技术发展的过程中,一般讲专用 DSP 芯片的实际数据处理速度要比通用 DSP 快。现在很多专用 DSP 的设计都在超大规模可编程逻辑门阵列器件 FPGA 或 ASIC 中完成,而 FPGA 和 ASIC 的内部并行或流水线结构可根据算法确定,并行功能单元的多少仅受芯片逻辑资源的限制,工作主频也很高,所以新的专用 DSP 设计在数据处理速度上的优势是较为明显的。

集成电路技术的巨大进步使专用集成电路(Application Specific Integrated Circuit, ASIC)的使用愈加广泛。将 DSP 的功能集成到 ASIC 中,把专用集成电路的高速专用性和 DSP 的通用可编程性结合,使电子设备功能的灵活性和实时性大大提高,这是 DSP 推广应用的一个新方向。例如在磁盘/光盘驱动器、调制解调器(Modem)、移动通信设备和个人数字助理(Personal Digital Assistant, PDA)等应用中,均是如此。这种设计应用进一步开拓了 DSP 市场。因此各 DSP 生产厂家相继提出了 DSP 核(DSP core)概念并推出了相应的产品。DSP 核是通用 DSP 器件中的 CPU 部分,将 DSP 核与按照用户要求选择的存储器(Cache、RAM、ROM、EPROM 以及用户软件的固化等)和外设(多种串口、并口、主机接口、DMA、定时器等)设计在一起,组成用户的专用 ASIC 芯片。使用户可以将自己的设计通过 DSP 厂家的专业技术来加以实现,从而大大提高 DSP 和专用集成电路的应用水平,并缩短产品的上市时间。读者可以在第二章中看到 TI 公司的 TMS320C6201 DSP 就是由 DSP 核 C6201 及相应的存储器与外设所构成的。DSP 核的一个典型应用就是 U. S. Robotics 公司利用 TI 技术所开发的 X2 芯片,最早成功地将 56 kbit/s 的 Modem 推向了市场。除了 TI 公司 TMS320 系列的 DSP 核之外, Motorola 公司的 DSP56000 系列和 AD 公司的 ADSP21000 系列等,也都是得到成功应用的 DSP 核。

4. 多核集成与 DSP 和 ARM

DSP 核除了和各种所需的外设集成在一起外,也可和其他微控制器或 DSP 核集成。由于微控制器的位控功能强,输入/输出接口种类多,但数字信号处理的运算能力弱,而现今许多控制算法都是数字信号处理算法的应用,所以在现阶段技术条件下,将二者的内核集成在一起就成为一个较好的解决办法。在嵌入式应用系统中,ARM(Advanced Risc Machines)公司的 ARM 处理器是较好的一种微控制器。ARM 公司通过转让 ARM 处理器内核技术给第三方,使其用来生产出