

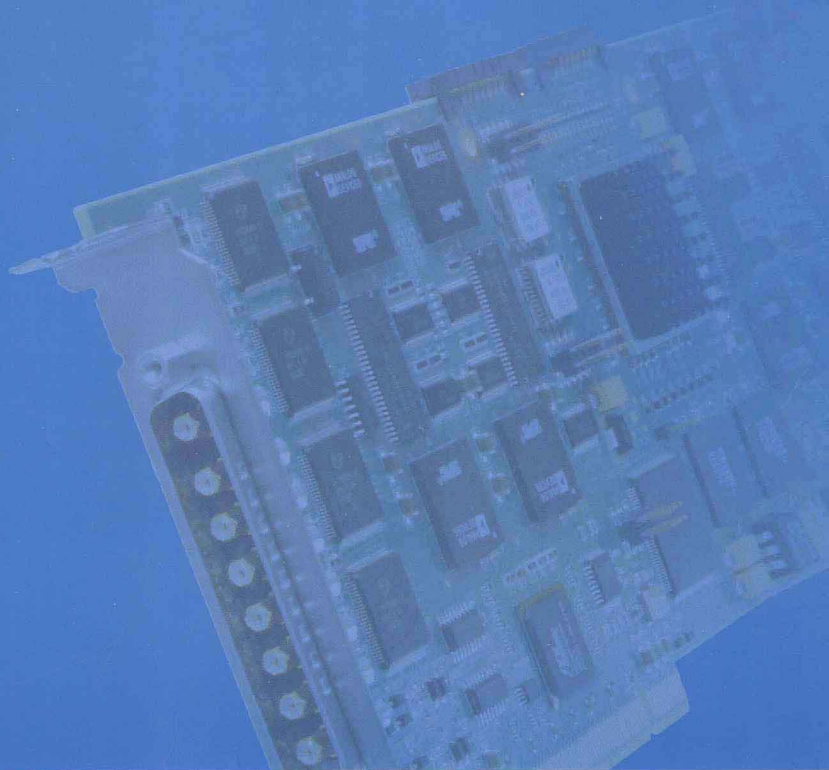


“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材

DSP

技术的发展与应用 第三版

□ 彭启琮 李玉柏 管 庆 编著



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS



“十二五”普通高等教育本科国家级规划

DSP

技术的发展与应用 第三版

DSP Jishu de Fazhan yu Yingyong

□ 彭启琮 李玉柏 管庆 编著

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

内容简介

《DSP 技术的发展与应用》(第三版)是“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材。全书共分八章:第一章简略地讨论数字信号处理的基本思想及其优越性,DSP 处理器的基本结构和特点,以及系统设计工程师们最为关心的如何评价和选择 DSP 处理器的问题。第二章介绍近年来 DSP 处理器和 DSP 核的最新发展。第三章讨论 DSP 的开发环境与工具,重点介绍 TI 公司的 DSP 集成开发环境 CCS。第四章比较详细地讨论了 DSP 方案的工程实现。第五章讨论通用算术运算及其 DSP 实现。第六章讨论通用数字滤波器设计及其 DSP 实现。第七章讨论通用频谱分析及其 DSP 实现。第八章以双音多频(DTMF)的编解码、MP3、VITERBI 译码等典型的工程应用为例,讨论设计 DSP 系统时应该考虑的问题。

本书的读者对象是电子信息类专业的研究生和高年级本科生,以及科学技术界和产业界从事 DSP 技术研究和开发的科研人员和工程技术人员。

图书在版编目(CIP)数据

DSP 技术的发展与应用/彭启琮,李王柏,管庆编著. — 3 版. — 北京:高等教育出版社,2013.5

ISBN 978-7-04-037054-6

I. ①D… II. ①彭… ②李… ③管… III. ①数字信号处理-高等学校-教材 IV. ①TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 048377 号

策划编辑 杜 炜
插图绘制 尹 莉

责任编辑 杜 炜
责任校对 杨雪莲

封面设计 张 楠
责任印制 张福涛

版式设计 余 杨

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
印 刷 北京市鑫霸印务有限公司
开 本 787mm × 960mm 1/16
印 张 31.5
字 数 570 千字
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.landraco.com>
<http://www.landraco.com.cn>
版 次 2002 年 9 月第 1 版
2013 年 5 月第 3 版
印 次 2013 年 5 月第 1 次印刷
定 价 48.60 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 37054-00

前言

半个世纪以来，DSP 技术的发展与推广应用，完全可以用如火如荼来形容。

自 2007 年本书第二版出版以来，无论是 DSP 技术本身还是其应用又有了极大的变化，促使我们尽快对其进行修订。

DSP 技术自身的发展和变化是惊人的。为了适应应用市场的需求，相关算法、处理器核和芯片及其开发、调试以及周边技术都在发生极大、极迅速的变化。

以移动通信领域的应用为例（之所以选择这个例子，是因为该领域历来是 DSP 技术发展和应用的最重要的领域之一。据统计，移动通信所使用的处理器已经占到市场份额的 70% 以上；其技术的进步也极为迅速，能够充分反映 DSP 技术的发展）。据市场调查公司统计，2011 年全球生产手机约 15 亿部，其中中国生产约 10 亿部。智能手机（smartphone）的数量增长更快，所占的市场份额也越来越大。

移动通信所采用的技术发展极快。短短的时间内就完成了从模拟技术向数字技术的更新换代。仅以传输码率来看，短短十几年的时间，从 2G 的 10 ~ 20 kbps，到 3G 的 384 kbps ~ 2 Mbps，再到 4G（LTE）的 100 Mbps ~ 1 Gbps。离开从基带到信道的数字信号处理算法的研究以及实现技术的进步，这样的发展速度完全无从谈起。

移动通信所提供的服务，从比较单纯的话音和短信通信，到图像和视频的采集记录与传输、导航和定位、电子邮件、网站浏览和检索、移动电视、收音与录音、蓝牙、购物与电子支付，各种服务功能不断丰富，不胜枚举。当然，要实现这些服务，远不仅仅是终端的问题，还需要有给予支撑的整个系统和基础设施，这就要求有更为复杂的算法、更为先进的实现平台以及相应的技术。云技术的发展将其推向了更高的水平。

以上种种都对作为主要支撑技术的 DSP 技术带来了巨大的压力和发展动力。无论是算法的开发与改善，还是算法实现平台的软硬件技术，都由此而获得了长足的进步。

一代又一代新的基础设施，要求有新的平台和新的算法，由此而催生了一代又一代高性能的多核 DSP 处理器。

一代又一代功能多样、性能卓越、花样翻新的手机，其实已经成为名副其

实的多媒体移动信息终端，催生了各种各样的应用处理器。其种类之多，生产厂商之多，竞争之激烈，已经打破了长期以来少数厂商的垄断。

我们的课程和教材都急切地需要更新，但又面临两难的局面。一方面，需要跟上新技术新产品的发展，使培养的学生满足市场的迫切需求；另一方面，按照教育规律，课程、教材以及相应的实验又需要相对稳定。

正是由此出发，我们开始了这本教材的修订工作。

我们的基本理念是：突出基本概念、基本算法及其实现。任何新的算法及其实现方法，都是这些最基本的东西的积累和发展，只要基本的东西清晰和牢靠，一定可以跟上技术和工艺的新发展。因为，算法及其工程实现已经自成体系，至于在什么样的平台上实现，完全可以根据软硬件技术的发展来决定，从而可以永远立于不败之地。这也就是我们常说的“授人以鱼，不如授之以渔”。

面对新器件的进化，我们介绍了结构发展的主要趋势，强调了目前应用比较广泛的 DSP 核，并由此出发，介绍高性能的同构多核 DSP 处理器以及由 DSP 处理器核和其他 MCU 核（主要是 ARM 核）所构成的异构多核 SoC 应用处理器；我们还用少量篇幅简单介绍了 ARM 核及处理器，因为它已经成为了嵌入式处理器（包括用于数字信号处理）的主要发展趋势之一。

新版教材的最大篇幅，用于讨论基本的数字信号处理算法及其在 DSP 核上的实现，这是我们希望学生掌握的最重要的东西。

鉴于 DSP 结构的发展和集成开发环境的极大改善，特别是 C 编译器效率的提高，DSP 算法实现的编程方式也发生了巨大的改变。为此，我们尽可能地压缩了有关汇编语言的部分，算法的实现基本上用 C 语言来完成。有些重要的例子，同时列出了 C 语言程序和汇编程序，供读者比较。

有关工程的实例，既有基本的系统设计和算法实现，也有当前应用最为广泛的一些例子。这样做的目的，既可以提高学生的兴趣，也可以培养学生综合应用所学知识的能力。

本书所涉及的材料，是截止到 2012 年 5 月的最新材料。

本书第三版继续由彭启琮担任主编。彭启琮修订了第一章和第二章，并对全书统稿与审校，李玉柏修订了第五章、第六章和第七章，管庆修订了第三章、第四章和第八章。研究生王凯、宋金涛、朱海、田心、袁高爽茜、赵俊青等参加了部分资料的翻译工作。

本书第三版仍然由清华大学胡广书教授审阅。胡教授对本书持续的关怀和帮助使我们深受感动。在此，谨表示我们对胡教授的深切谢意。

对于本书的修订，高等教育出版社的编辑和德州仪器（上海）有限公司的大学计划部给予了很大的帮助，在此向他们致以诚挚的谢意。

DSP 技术发展之迅速和应用之广泛，使我们越来越感到目不暇接。对于我们修订的理念和书中必然存在的不当和错讹之处，敬请使用和阅读本书的老师、同学以及科技界和产业界的同行们批评指正，以便我们在重印和再次修订时改正。

编著者

2012 年 8 月于电子科技大学



第二版前言

DSP 技术的发展,无论是理论和算法的发展,还是 DSP 处理器的发展,其速度往往超出我们的预料。

DSP 技术的发展,极大地促进了其应用面的扩大和应用程度的深入;而应用的发展,又不断地对技术的发展提出新的、更高的要求,一个相互促进的良性循环已然形成。

促使我们对本书进行修订的主要原因有两个:

本书出版 4 年来,有很多新的 DSP 处理器面市,为我们提供了新的选择。新的应用,特别是以移动通信、多媒体和流媒体、消费类电子产品(数码相机和摄像机、MP3 等)为代表的市场需求,使得 DSP 处理器以及以 DSP 核和 MCU 核为基础的 SoC 的发展,更加引人注目。

很多学校使用本书作为教材,很多公司使用本书作为培训教材和工程师的参考书。使用本书的教师、学生们以及业界的工程师们,对本书提出了很好的意见和建议。我们自己在使用中也发现了许多需要改进之处。

本版所做的修改,主要反映在以下几个方面:

对主要厂商的 DSP 处理器和基于 DSP 核的 SoC 器件,做了发展性的介绍。更新了 TI 的 TMS320C2000、C5000、C6000 三大系列 DSP 处理器的介绍。本修订版所涉及的材料,截止到 2006 年 10 月。

强化了与“数字信号处理”课程的联系,使学生更易于掌握基本的主要算法(如 FFT、FIR 滤波器、IIR 滤波器、自适应滤波等)的工程实现。这样做,主要是为了满足“数字信号处理”课程之后,开设以工程实验为主的“DSP 技术”课程的需要,以便使学生具有更好的理论素养和工程素养,这是当前市场急需的 DSP 技术人才所必需的素养。

强化了 DSP 工程实现中的难点介绍,如开发环境和工具的使用、片上外设和算法支持库的使用、实时操作系统(RTOS)的介绍等。无论对于教师、学生,还是对于业界从事 DSP 研究和开发的工程师,这些都是很重要的。

更多的算法用 C 语言来编写,使其更容易理解,具有更好的通用性与可移植性,以便符合当前 DSP 开发环境的发展趋势。

充实和更换了一些应用实例。

增加了思考和练习题。

订正了第一版中的不当与错讹之处。

本修订版由彭启琮担任主编，对全书统稿与审校，并修订了第1章到第3章；李玉柏修订了第6章和第7章；管庆修订了第4章、第5章和第8章；潘晔重新编写了实时操作系统（RTOS）的有关部分；研究生曾箐等参加了部分程序的编写工作。

像本书2002年出版第一版时一样，本修订版仍然由清华大学胡广书教授审阅。胡教授对本书持续的关心和帮助，使我们深受感动。在此，谨表示我们对胡教授深深的谢意。

对于本书的修订，德州仪器（上海）公司的大学计划部门给予了很大的帮助，特向他们致以诚挚的谢意。对高等教育出版社编辑们认真细致的工作和付出的辛勤劳动表示由衷的敬意和感谢。

由于我们的水平和视野所限，书中必然还有不当和错讹之处，敬请使用本书的教师、学生以及科技界的同行们批评指正，以便我们在重印和再次修订时改正。

编著者

2006年12月于电子科技大学

第一版前言

信息化已经成为社会发展的大趋势。信息化是以数字化为背景的,而 DSP 技术则是数字化最重要的基本技术之一。

在过去的短短的 20 年来里,DSP 处理器的性能得到很大改善,软件 and 开发工具也得到相应的发展,价格却大幅度地下降,从而得到越来越广泛的应用。通信领域(移动通信的交换设备、基站和手机,网络的路由和交换设备,智能天线,软件无线电,IP 电话等),雷达和声纳系统,巡航导弹、灵巧炸弹及各种武器系统,自动测试系统,医疗诊断设备(CT、核磁共振、B 超等),计算机及其外设,消费类电子设备(VCD、DVD、HDTV、机顶盒、MP3、家庭影院系统、数字照相机和摄像机等),机器人及各种自动控制系统,等等,应用范围不胜枚举。

近几年迅速发展的系统集成芯片(SoC, System on Chip),大多以 DSP 核和 MCU 核为核心。因此,DSP 技术也已经成为集成电路设计的核心技术之一。

由此可见,社会的发展和技术的进步,已经将 DSP 技术从一门很专业的学科,推进成极为活跃并广为人知的前沿技术。广大学生和工程技术人员学习 DSP 技术的热情空前高涨,迫切需要有关的最新教材和技术资料。

传统的数字信号处理课程,大多只讨论算法的理论及其推导,较少涉及实现方法及相关的软/硬件技术,和产业界的要求相去较远。

国内外的教育界都在就此寻求改革的途径。目前,主要是沿着两条途径。一是使用 MATLAB 等工具软件,对数字信号处理的算法进行软件仿真;一是引入已经被工程界广泛使用的 DSP 器件,指导学生完成数字信号处理算法的实现,特别是实时(Real Time)实现。

近年来,DSP 技术在我国也得到了很好的发展。在科学技术研究和产品开发中,DSP 技术都得到了广泛的应用,并取得了丰硕的成果。反映在教育上,越来越多的高等学校开设了有关的课程和实验,编写和出版了一批质量很好的专著和教材。但是,随着 DSP 技术应用的广泛和深入,产业界、教师和学生对有关课程及其教材的要求也越来越高。一方面,要求反映有关技术和产品的最新进展;另一方面,要求对算法和 DSP 器件的选择以及系统的设计和实现等进行指导。这也就成为我们大幅度修改已经出版的教材、满足教育和产业市场需求的动力。

本书的第一章, 简略地讨论数字信号处理的基本思想及其优越性。第二章介绍世界上各大公司(包括 TI、Agere、Freescale、ADI 等) DSP 处理器的最新发展以及系统设计工程师们最为关心的如何评价和选择 DSP 处理器问题。第三章比较系统地介绍目前在国内外应用最为广泛的德州仪器(TI)的 TMS320C2000、C5000 和 C6000 系列 DSP 处理器的硬件和软件结构。第四章讨论 DSP 的开发环境与工具。

第五章至第七章, 讨论常用的数字信号处理算法(如 FFT、FIR、IIR、自适应滤波等)及其 DSP 实现, 并讨论 DSP 系统设计中最常见的 A/D 和 D/A 转换、信号调理、接口、硬件和软件设计、调试等工程问题。

本书最后的第八章, 以双音多频(DTMF)的编/解码、MP3、VITERBI 解码等典型的工程应用为例, 讨论设计 DSP 系统时应该考虑的问题。

本书的读者对象, 是电子信息类专业的研究生和高年级本科生以及科学技术界和产业界从事 DSP 技术研究和开发的科研人员和工程技术人员。

本书的目的, 是希望通过这些讨论, 使学生和业界的工程师在接受实际的工程任务后, 能从任务的要求入手, 选择合适的数字信号处理算法; 综合各方面的因素, 选择合适的 DSP 处理器; 进行系统的设计、实现和调试, 最后完成任务。

本书由彭启琮主编, 并编写了第一到三章和第八章, 李玉柏编写了第五至七章, 管庆编写了第四章。

本书由清华大学胡广书教授审阅, 胡教授认真地审阅了全部文稿, 并逐章提出了中肯的意见, 使我们受益匪浅, 对书稿做了最后的修改。在此, 向胡教授表示衷心的感谢。

本书是在高等教育出版社的大力支持下出版的, 编辑们为此付出了艰辛的劳动。我们对他们的敬业精神和出色的工作表示由衷的敬意和感谢。

编著者

2002 年 5 月于电子科技大学

郑重声明

高等教育出版社依法对本书享有专有出版权。任何未经许可的复制、销售行为均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人将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，保护读者的合法权益，避免读者误用盗版书造成不良后果，我社将配合行政执法部门和司法机关对违法犯罪的单位和个人进行严厉打击。社会各界人士如发现上述侵权行为，希望及时举报，本社将奖励举报有功人员。

反盗版举报电话 (010)58581897 58582371 58581879

反盗版举报传真 (010)82086060

反盗版举报邮箱 dd@hep.com.cn

通信地址 北京市西城区德外大街4号 高等教育出版社法务部

邮政编码 100120

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 DSP 技术的概念及其发展	1
1.2 数字信号处理的优势	2
1.3 DSP 核和 DSP 处理器的主要结构特点	5
1.3.1 哈佛结构和改善的哈佛结构	5
1.3.2 流水技术 (Pipeline)	6
1.3.3 硬件乘法器和乘-加 (MAC) 指令	6
1.3.4 独立的直接存储器访问 (DMA) 总线及其控制器	7
1.3.5 数据地址发生器 (DAG)	7
1.3.6 丰富的外设 (peripherals)	7
1.3.7 定点 DSP 处理器与浮点 DSP 处理器	8
1.4 如何评价 DSP 核和 DSP 处理器	10
1.4.1 传统的性能评价方法 (MIPS、MOPS 和 MMACS)	10
1.4.2 应用型评价指标	11
1.4.3 BDTI 的核心算法评价指标	11
1.4.4 核心算法执行情况的测量	13
1.4.5 评价结果	13
1.4.6 应用分析	14
1.4.7 其他考虑	15
1.4.8 EEMBC 性能指标	17
1.5 如何选择 DSP 核和 DSP 处理器	17
1.5.1 数据格式	18
1.5.2 数据宽度	19
1.5.3 速度	19
1.5.4 存储器的安排	20
1.5.5 容易开发	21
1.5.6 支持多处理器	22
1.5.7 功耗与电源管理	23

1.5.8 成本	23
1.5.9 结论	23
思考题与练习题	24
第2章 DSP 核和 DSP 处理器的新发展	25
2.1 DSP 核和 DSP 处理器实现高速运算的途径	25
2.1.1 硬件乘法器及乘-加单元	25
2.1.2 多个执行单元	26
2.1.3 高效的存储器访问	26
2.1.4 数据格式	27
2.1.5 零开销循环	27
2.1.6 数据流的线性 I/O	27
2.1.7 专门的指令集	27
2.2 当前 DSP 处理器结构的发展趋势	28
2.2.1 传统的 DSP 处理器	28
2.2.2 强化的传统结构 DSP 处理器	29
2.2.3 并行结构	30
2.2.4 单指令多数据 (SIMD)	32
2.2.5 其他形式的 DSP 处理器	33
2.3 新近推出的 DSP 核和 DSP 处理器	34
2.3.1 Lucent 公司和 Motorola 公司联合开发的 Starcore	34
2.3.2 ADI 公司和 Intel 公司联合开发的 DSP 核——Blackfin	36
2.3.3 TI 公司新的系列 DSP 核	38
2.3.4 ARM 核	42
2.4 新近推出的多核 DSP 处理器	45
2.4.1 同构多核 DSP 处理器	45
2.4.2 集成了 DSP 核的异构多核 SoC 处理器	55
思考题与练习题	58
第3章 DSP 的开发环境和工具	60
3.1 集成开发环境 CCS	60
3.1.1 CCS 的功能	61
3.1.2 利用 CCS 开发 DSP 程序的流程	61
3.1.3 CCS 中代码生成工具的使用	68

3.1.4	CCS 中调试工具的使用	74
3.1.5	探针 (probe points) 工具的使用	82
3.1.6	图形工具的使用	84
3.1.7	分析工具 (profile points) 的使用	86
3.1.8	DSP 片级支持库 (Chip Support Library, CSL) 的使用	88
3.1.9	CMD 内存定位文件的使用	93
3.2	DSP/BIOS 的应用	106
3.2.1	什么是 DSP/BIOS	107
3.2.2	DSP/BIOS 中线程的管理	108
3.2.3	建立 DSP/BIOS 的配置文件	113
3.2.4	用 DSP/BIOS 创建应用程序	114
3.2.5	DSP/BIOS 系统工具的使用	119
3.2.6	DSP/BIOS 中 API 函数的调用	124
3.2.7	使用 DSP/BIOS 工具开发应用程序的例子	125
3.3	C6Run 的使用	129
3.3.1	什么是 C6Run	129
3.3.2	C6Run 的安装和配置	130
3.3.3	C6RunLib 的使用	131
3.3.4	C6RunApp 的使用	133
3.4	C6Accel 的使用	134
3.4.1	什么是 C6Accel	135
3.4.2	C6Accel 的环境和配置	135
3.4.3	C6Accel 的使用	137
3.5	C6Flo 的使用	143
3.5.1	什么是 C6Flo	143
3.5.2	C6Flo 的安装和配置	143
3.5.3	C6Flo 的使用	144
3.5.4	C6Flo 的应用例子	147
3.6	XDC 的使用	149
3.6.1	XDC 概述	149
3.6.2	XDC 调用	151
3.6.3	基于 XDC 的应用程序开发	151
	思考题与练习题	159

第 4 章 DSP 方案工程实现	164
4.1 DSP 方案设计基础	164
4.2 数字化基础	168
4.2.1 模拟信号、离散信号与数字信号	168
4.2.2 离散时间系统	170
4.3 模数 (A/D) 转换及电路设计	174
4.3.1 信号调理	175
4.3.2 信号的采样及奈奎斯特采样定理	175
4.3.3 模数 (A/D) 转换的原理及常用器件	177
4.3.4 ADC 的技术指标和量化噪声分析	182
4.4 DSP 最小系统设计	186
4.4.1 认识 DSP 芯片	186
4.4.2 DSP 引导方式 (Bootloader) 选择	188
4.4.3 DSP 扩展存储器设计	192
4.4.4 DSP 时钟设计	195
4.4.5 DSP 电源设计	197
4.4.6 DSP 系统中 A/D、D/A 转换器的设计	199
4.4.7 DSP 的硬件开发调试工具	201
4.5 DSP 代码的优化	207
4.5.1 通过编译器的选择开关实现优化	208
4.5.2 软件流水线 (software pipeline)	208
4.5.3 从编译器获取反馈信息	212
4.5.4 使用 UNROLL 指令展开循环	216
4.5.5 更多的优化策略	219
4.5.6 优化代码长度	224
4.5.7 使用内联函数操作 (Intrinsic Operations)	226
4.5.8 使用已有的 DSP 库	227
4.5.9 Cache 的使用	227
4.6 DSP 中定点数和浮点数的运算	228
4.6.1 DSP 中定点小数的表示	228
4.6.2 如何实现定点小数的运算	230
4.6.3 溢出及处理方法	234
4.6.4 DSP 中浮点数的表示和运算方法	238

思考题与练习题	241
第 5 章 通用算术运算及其 DSP 实现	247
5.1 DSP 的基本算术运算	247
5.1.1 整数除法和求模运算	247
5.1.2 小数乘法和除法运算	254
5.1.3 双精度运算	255
5.1.4 在浮点 DSP 上实现除法运算	257
5.1.5 在定点 DSP 上实现浮点算术运算	261
5.2 平方根运算	267
5.3 对数运算和指数运算	273
5.3.1 在定点 DSP 上实现对数运算	273
5.3.2 在定点 DSP 上实现指数运算	275
5.4 三角函数运算	278
5.4.1 正弦波的产生方法	278
5.4.2 在定点 DSP 上产生正弦波	282
5.5 数字调制解调运算	287
5.5.1 数字调制原理	287
5.5.2 数字解调原理	293
5.5.3 数字调制解调的 DSP 编程与实现	297
思考题与练习题	309
第 6 章 通用数字滤波器设计及其 DSP 实现	311
6.1 数字滤波器设计基础	311
6.1.1 数字滤波器的分类	312
6.1.2 数字滤波器的分析方法	314
6.1.3 数字滤波器的设计方法	317
6.2 无限冲激响应 (IIR) 滤波器及其 DSP 实现	322
6.2.1 IIR 滤波器的结构	323
6.2.2 双线性变换法设计 IIR 滤波器	327
6.2.3 IIR 滤波器的编程实现	330
6.3 有限冲激响应 (FIR) 滤波器及其 DSP 实现	333
6.3.1 线性相位数字滤波器的结构	334
6.3.2 用傅里叶级数设计 FIR 滤波器	337

6.3.3	FIR 滤波器的 DSP 实现	339
6.3.4	用窗函数改善 FIR 滤波器特性	345
6.4	自适应滤波的实现	348
6.4.1	自适应滤波器的应用	349
6.4.2	自适应滤波器的体系结构	352
6.4.3	LMS 自适应算法	356
6.4.4	自适应滤波器的 DSP 实现	358
	思考题与练习题	363
第 7 章	通用频谱分析及其 DSP 实现	364
7.1	DFT (离散傅里叶变换) 原理	364
7.1.1	DFT 的定义	365
7.1.2	DFT 的性质	365
7.1.3	DFT 的运算量	368
7.2	FFT (快速傅里叶变换)	368
7.2.1	旋转因子的性质	368
7.2.2	FFT 算法	369
7.3	基-2 FFT 的算法分析与编程实现	373
7.3.1	DIT (时间抽取) 基-2 FFT 算法分析	374
7.3.2	FFT 算法中的位倒序问题	377
7.3.3	DIF (频率抽取) 基-2 FFT 算法分析	379
7.3.4	FFT 编程举例	381
7.4	基-4 的 FFT 算法分析与编程实现	397
7.4.1	基-4 的 FFT 算法原理	398
7.4.2	基-4 的 FFT 算法特点	400
7.4.3	C62x 上实现基-4 的 FFT 算法编程	401
7.5	FFT 的实现问题分析	411
7.5.1	频率分辨率和加窗	411
7.5.2	运算量问题	413
7.5.3	有限字长效应	414
7.5.4	快速傅里叶逆变换	415
	思考题与练习题	416