

DSP应用大观



林静然 编著 彭启琮 审校

基于 **TI DSP** 的通用算法实现

- 围绕应用，重点突出实用
- 全面覆盖，资料及时、权威
- 专家筛选，内容深入、经典



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>



内容简介

DSP 应用大观

基于 TI DSP 的通用算法实现

林静然 编著

彭启琮 审校

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是电子工业出版社《DSP 应用大观》系列丛书中的一本。本书讨论了几种通用数字信号处理算法在 TI 各系列 DSP 处理器上的高效实现问题。本书共 6 章。第 1 章是全书的基础部分, 简要介绍了本书所要讨论的通用数字信号处理算法, 以及 TI 公司各系列 DSP 处理器的基础知识。第 2~6 章分别讨论了复杂算术运算、FFT/IFFT、IIR、FIR 及自适应滤波算法, 在 TI 各系列 DSP 处理器上的高效实现方法。

本书可作为电子类专业研究生和高年级本科生 DSP 技术类课程的实验教材和 DSP 工程师的培训教材。对于从事 DSP 开发的工程技术人员, 本书也不失为一本有用的技术手册。

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

基于 TI DSP 的通用算法实现/林静然编著. —北京: 电子工业出版社, 2008.6
(DSP 应用大观)

ISBN 978-7-121-06831-7

I. 基… II. 林… III. 数字信号—信息处理系统—算法 IV. TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 079449 号

策划编辑: 万子芬

责任编辑: 韩玉宏

印 刷: 北京东光印刷厂

装 订: 三河市万和装订厂

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: 787×1 092 1/16 印张: 25.5 字数: 652.8 千字

印 次: 2008 年 6 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 52.00 元

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

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

服务热线: (010) 88258888。

《DSP 应用大观》丛书编委会

编委会主任：彭启琮

编委会成员：张旭东 方向忠 张太镒 徐科军
 沈 洁 谭 徽 竺南直

编委会秘书：万子芬

有关本丛书及其他与 DSP 相关选题的意见、建议和写作意向，
请按以下方式联系：wzf@phei.com.cn 010-88254461

丛书序言

DSP 技术的发展与应用,正在我国教育界、科技界和工程界蓬勃地展开。数以百计的大学建设了 DSP 技术实验室,开设了相关的课程和实验;大量的相关教材、技术手册和应用书籍得到编写、编译和出版。更为重要的是,基于 DSP 技术的研究和开发,无论是涉及的范围,还是达到的深度,都令人叹为观止。以两年一度的 TI DSP 大赛为例,每次都有数十所大学的上百支代表队参赛,参赛者所表现出来的选题的广度、算法研究的深度,算法实现和系统设计及实现的娴熟程度,无不令人振奋。

随着教学、科研的发展和深入,教师、学生、以及科研和工程技术人员已经不再满足于对 DSP 的粗浅了解;市场的发育,对 DSP 技术的发展和应用也提出了越来越高的要求。在这样的形势下,编写和出版一套 DSP 应用汇编丛书,就成为了一种强烈的需求,并迅速在出版社、TI 公司以及编写者之间达成了共识。

我们也注意到,在全球范围内,随着 DSP 技术应用范围的扩大和应用程度的深入,通用 DSP 器件的增幅在逐步减缓,而基于 DSP 核的各种 SoC、ASSP 以及嵌入式系统,正在以更快的速度发展。对于 DSP 工程师来说,开发算法并将算法在 DSP 芯片或 DSP 核上实现,还将仍然是长期的重要任务。本丛书的编写和出版,正是基于这样的认识和理解。

这套丛书是这样设计的:

按应用领域来分类,先在几个重要的领域,例如,通信信号处理、图像/视频信号处理、音频/语音信号处理、工业控制、通用信号处理算法、DSP 接口与软件工具等,各出一个选题。每个选题以 TI 网站上公开的 Application notes 为基本内容,为了便于读者理解和使用,各书的编译者对所介绍的内容,都不同程度增加了补充性的介绍。

这套丛书是开放的,这里所指的开放,包含以下两重意思:一方面,随着各领域的技术进步,新的算法和新的器件层出不穷,本丛书对新的算法及其实现的介绍也会继续下去;另一方面,欢迎广大的读者对丛书的选题和内容提出意见和建议,更欢迎有志者加入编写者的行列。

本丛书第一批选题的作者,是各高校多年从事 DSP 技术研究和实践的教师,以及他们的一些研究生,他们在各自的领域具有长期的知识积累和丰富的实践经验,为本丛书的选题、编写和出版付出了辛勤的劳动。

TI 公司对本丛书所使用的文档予以了授权, TI (中国) 大学计划对丛书的编写和出版给予了一贯的支持和鼓励。电子工业出版社的编辑们,首先提出了本丛书的创意,积极参与了选题策划和论证,认真地完成了编辑和出版工作。在此,对所有为本丛书的选题、编写、出版作出贡献的单位和人士,致以深切的谢意和敬意。

希望这套丛书的出版,能对推动我国 DSP 技术的教育和应用起到微薄的作用,衷心希望得到广大读者的支持、意见和建议。



电子科技大学教授
2008 年 4 月

前言

数字化已经成为社会发展的一大趋势。它渗透到了社会生活的各个领域,如通信系统,雷达和声呐系统,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,计算机及其外设,消费类电子设备,机器人及各种自动控制系统等,不胜枚举。

数字化的核心是数字信号处理。数字信号处理的内涵,决定了它是一门理论与实践并重的学科。事实上,从诞生的那一天起,数字信号处理就一直沿着理论和实践这两个方向,相互促进,不断向前发展。一方面,它的理论体系在不断丰富和完善,新的算法不断提出;另一方面,随着 IC 技术与产业的飞速发展,硬件处理器的性能得到了很大改善,新的处理器不断出现,为数字信号处理开拓了更加广阔的应用空间。

随着以 TI 公司的 TMS320 系列为代表的 DSP 处理器的出现及飞速发展,从根本上改变了主要依靠通用微处理器实现数字信号处理算法的局面,使复杂算法的实时实现成为可能,同时也有力地促进了数字信号处理理论的发展。DSP 技术已经成为数字化最重要的基本技术之一,无论在其应用的广度还是深度方面,都正以前所未有的速度向前发展。广大学生和工程技术人员学习 DSP 技术的热情空前高涨,迫切需要相关的教材和技术资料。

传统的有关 DSP 技术的教材和书籍,要么侧重于讨论数字信号处理算法的理论及其推导,要么侧重于介绍各种 DSP 处理器的软/硬件技术,如外围接口、电路设计、开发环境等,较少涉及数字信号处理算法在 DSP 处理器上的实现问题。已有的研究发现,在相同的 DSP 处理器上实现相同的算法,不同的实现方法所带来的效率上的差异可达数十倍,甚至更多。效率是 DSP 技术的生命。因此,如何将算法的原理和 DSP 处理器的特点(如哈佛结构、硬件乘法器、并行结构、流水技术、存储器和外设结构等)紧密结合起来,从而在 DSP 处理器上高效地实现算法,已经成为每一个 DSP 工程师都必须面对和迫切需要解决的问题之一。这也成为我们编写本书的目标和原动力。

本书讨论了几种通用数字信号处理算法在 TI 各系列 DSP 处理器上的高效实现问题。

本书涉及的通用数字信号处理算法,包括复杂的算术运算、FFT/IFFT、IIR/FIR 及自适应滤波等。选择这些算法作为本书讨论的重点,主要基于以下考虑。首先,和很多新的数字信号处理算法相比,这些通用算法已非常成熟,研究成熟算法的高效实现问题显然更有价值。其次,通用算法是现代信号处理的基础,很多新算法的核心模块,都是由通用算法构成的。因此,高效地实现这些通用算法也有助于提高新算法的实现效率。

另外,本书选择了 TI 的 DSP 处理器作为算法实现的硬件平台,主要的考虑如下。首先, TI DSP 目前在国内外的应用最为广泛,拥有最大的用户群。其次, TI DSP 具有很多目前主流 DSP 处理器的共同特点,因此,这里讨论的算法在 TI DSP 上的高效实现方法,可以容易地扩展到其他厂商的 DSP 处理器上。

本书共分 6 章。第 1 章是全书的基础部分,简要介绍了本书所要讨论的通用数字信号处理算法,以及 TI 公司各系列 DSP 处理器(包括 C2000、C5000 和 C6000)的基础知识。第 2~6 章分别讨论了通用数字信号处理算法在 TI 各系列 DSP 处理器上的高效实现方法。各章首先对算法的原理及其在实现上需要注意的问题作简要介绍;然后再分别讨论算法在各个系列 DSP 上的实现问题,包括精度、溢出、并行实现、C 语言程序实现、汇编程序实现、DSP Library

实现等。第2章讨论了各种复杂算术运算（包括除法运算、三角函数运算、平方根运算、对数运算等）在TI各系列DSP处理器上的高效实现问题，以及如何在定点DSP上高效地实现浮点运算。第3章讨论了快速傅里叶变换（FFT）及其逆变换（IFFT）在TI各系列DSP处理器上的实现问题。在简单介绍了FFT/IFFT算法的原理之后，重点讨论了实数序列FFT的实现、FFT算法在定点DSP处理器上的溢出问题、精度扩展、DSPLIB的使用等一系列问题。第4章讨论了无限冲激响应（IIR）滤波器在TI各系列DSP处理器上的实现问题。IIR滤波器具有反馈结构，因此，溢出问题在其实现过程中就显得尤为重要。本章结合TI各系列DSP处理的特点，从改进结构和扩展精度等方面详细讨论了如何避免溢出，从而高效地实现IIR滤波器。第5章讨论了有限冲激响应（FIR）滤波器在TI各系列DSP处理器上的实现问题。其中，如何有效地组织存储区域和利用DSP的MAC单元来高效地实现FIR滤波器是本章讨论的重点。第6章讨论了自适应滤波算法（重点是LMS算法）在TI各系列DSP处理器上的实现问题。除了标准的LMS算法之外，本章还讨论了其各种改进算法（如延迟LMS算法，泄漏LMS算法、符号LMS算法等）在DSP处理器上的实现，以便读者能根据具体的应用选择合适的算法来解决问题。同时，本书还提供了相应的代码以便读者在具体应用时进行参考。

本书的读者对象是电子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。

彭启琮教授首先提出了本书的创意，并对本书进行了审校。彭教授认真地审阅了全部文稿，从本书的结构到各章的内容都提出了中肯的意见，为本书增色不少。在此，向彭教授表示衷心的感谢！本教研室的王晓建、晏飞、刘允、安文彦等研究生在本书的资料收集、整理和翻译等方面做了大量的工作，在此一并表示感谢！

本书的编写工作得到了TI公司（中国）大学计划和电子工业出版社的大力支持。TI公司授权我们使用他们的文档。电子工业出版社的编辑们为本书付出了辛勤的劳动。我们对他们表示由衷的敬意和感谢！

由于作者水平有限，不妥及错误之处在所难免，恳请读者给予批评指正。

作者

电子科技大学

2008.3.10

注：书中的一些源代码请参见电子工业出版社网站（<http://www.phei.com.cn>）的“图书资源下载”栏目，请读者自行浏览下载。

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 数字信号处理的理论和方法	1
1.1.1 数字信号处理的优势	2
1.1.2 数字信号处理理论的发展	5
1.1.3 通用数字信号处理算法及其实现问题	6
1.2 数字信号处理的实现	8
1.2.1 软件实现	8
1.2.2 硬件实现	9
1.2.3 有限字长效应	9
1.3 DSP 处理器的基础知识	15
1.3.1 DSP 处理器的数据格式	15
1.3.2 DSP 处理器的主要结构特点	17
1.3.3 如何评价 DSP 处理器	20
1.4 美国德州仪器公司 (TI) 的系列 DSP 处理器	22
1.4.1 TI 公司 DSP 处理器的分类方法	22
1.4.2 TMS320C2000 系列的结构及主要性能	24
1.4.3 TMS320C3x 系列的结构及主要性能	31
1.4.4 TMS320C5000 系列的结构及主要性能	37
1.4.5 TMS320C6000 系列的结构及主要性能	51
1.4.6 TI DSP 的开发环境与工具	61
1.5 小结	63
参考文献	63
第 2 章 复杂算术运算及其在 TI DSP 上的实现	64
2.1 除法运算	64
2.1.1 在定点 DSP 上实现除法运算	64
2.1.2 在浮点 DSP 上实现除法运算	77
2.2 平方根运算	84
2.3 对数运算和指数运算	91
2.3.1 在定点 DSP 上实现对数运算	92
2.3.2 在定点 DSP 上实现指数运算	94
2.4 三角函数运算	96
2.4.1 正弦波的产生方法	96
2.4.2 在定点 DSP 上产生正弦波	100
2.5 使用 DSPLIB 完成复杂算术运算	109

2.5.1 DSPLIB 的特点和组成	109
2.5.2 DSPLIB 的下载和安装	110
2.5.3 TMS320C67xx RTS/FastRTS Library 的使用及性能分析	110
2.5.4 编写 DSPLIB	113
2.6 在定点 DSP 上实现浮点算术运算	113
2.7 小结	118
参考文献	118
第 3 章 快速傅里叶变换在 TI DSP 上的实现	119
3.1 离散傅里叶变换的介绍	119
3.1.1 离散傅里叶变换	119
3.1.2 离散傅里叶变换的性质	120
3.1.3 离散傅里叶变换的运算量	122
3.2 快速傅里叶变换的介绍	122
3.2.1 旋转因子的性质	122
3.2.2 快速傅里叶变换	123
3.2.3 比较 DFT 和 FFT	129
3.3 快速傅里叶变换的实现问题	130
3.3.1 频率分辨率和加窗	130
3.3.2 运算量问题	131
3.3.3 有限字长效应	133
3.4 快速傅里叶变换的 MATLAB 实现	134
3.5 快速傅里叶变换的 C 语言程序实现	134
3.6 快速傅里叶变换在定点 DSP 上的实现	137
3.6.1 在 TMS320C2x 上实现 FFT 算法	137
3.6.2 在 TMS320C54x 上实现 FFT 算法	142
3.6.3 在 TMS320C55x 上实现 FFT 算法	160
3.6.4 在 TMS320C62x 上实现 FFT 算法	178
3.6.5 在 TMS320C64x 上实现 FFT 算法	204
3.7 快速傅里叶变换在浮点 DSP 上的实现	205
3.7.1 在 TMS320C3x 上实现 FFT 算法	205
3.7.2 在 TMS320C67x 上实现 FFT 算法	211
3.8 小结	213
参考文献	214
第 4 章 无限单位冲激响应 (IIR) 数字滤波器及其在 TI DSP 上的实现	216
4.1 IIR 滤波器的基本原理	216
4.1.1 IIR 滤波器的特点	217
4.1.2 IIR 滤波器的结构	218
4.1.3 IIR 滤波器的稳定性问题	221

4.2	IIR 滤波器的设计	222
4.2.1	由模拟滤波器设计 IIR 数字滤波器	222
4.2.2	直接法设计 IIR 数字滤波器	230
4.3	IIR 数字滤波器在 MATLAB 上的实现	230
4.3.1	使用 MATLAB 函数设计 IIR 数字滤波器	230
4.3.2	使用 FDATool 设计 IIR 数字滤波器	231
4.3.3	利用 MATLAB 对滤波器系数进行量化	234
4.4	IIR 数字滤波器的 C 语言程序实现	235
4.5	IIR 数字滤波器在定点 DSP 上的实现	235
4.5.1	避免溢出的缩放方案	236
4.5.2	在 TMS320C2x 上实现 IIR 数字滤波器	243
4.5.3	在 TMS320C54x 上实现 IIR 数字滤波器	244
4.5.4	在 TMS320C55x 上实现 IIR 滤波	268
4.5.5	在 TMS320C62x 上实现 IIR 滤波	270
4.5.6	在 TMS320C64x 上实现 IIR 滤波	272
4.6	IIR 数字滤波器在浮点 DSP 上的实现	274
4.6.1	在 TMS320C3x 上实现 IIR 滤波	274
4.6.2	在 TMS320C67x 上实现 IIR 滤波	275
4.7	小结	276
	参考文献	276
第 5 章	有限单位冲激响应 (FIR) 数字滤波器及其在 TI DSP 上的实现	279
5.1	FIR 滤波器原理	279
5.1.1	FIR 滤波器的特点	280
5.1.2	FIR 滤波器的结构	280
5.2	FIR 滤波器设计	284
5.2.1	数字滤波器的指标	284
5.2.2	窗函数法设计 FIR 数字滤波器	285
5.2.3	利用最优化方法设计 FIR 数字滤波器	288
5.3	使用 FFT 实现 FIR 数字滤波器	294
5.3.1	基本原理及运算量分析	294
5.3.2	重叠相加法	295
5.3.3	重叠保留法	297
5.4	FIR 数字滤波器在 MATLAB 上的实现	297
5.4.1	使用 MATLAB 函数设计 FIR 数字滤波器	297
5.4.2	使用 FDATool 设计 FIR 数字滤波器	299
5.4.3	利用 MATLAB 对滤波器的系数进行量化	301
5.5	FIR 数字滤波器的 C 语言程序实现	303
5.6	FIR 数字滤波器在定点 DSP 上的实现	303
5.6.1	在 TMS320C2x 上实现 FIR 滤波器	304

5.6.2	在 TMS320C54x 上实现 FIR 滤波器	305
5.6.3	在 TMS320C55x 上实现 FIR 滤波器	311
5.6.4	在 TMS320C62x 上实现 FIR 滤波器	316
5.6.5	在 TMS320C64x 上实现 FIR 滤波器	318
5.7	FIR 数字滤波器在浮点 DSP 上的实现	321
5.7.1	在 TMS320C3x 上实现 FIR 滤波器	321
5.7.2	在 TMS320C67x 上实现 FIR 滤波器	322
5.8	小结	323
	参考文献	323
第 6 章	自适应滤波器及其在 TI DSP 上的实现	325
6.1	自适应滤波器介绍	325
6.1.1	自适应滤波器的一般形式	326
6.1.2	自适应滤波器的应用	326
6.2	自适应滤波器的结构	331
6.2.1	横截型结构	332
6.2.2	对称的横截型结构	332
6.2.3	格型结构	333
6.3	自适应算法	334
6.3.1	最小均方误差准则	335
6.3.2	标准 LMS 算法	336
6.3.3	归一化 LMS 算法	337
6.3.4	泄漏 LMS 算法	337
6.3.5	符号 LMS 算法	338
6.3.6	复数 LMS 算法	339
6.3.7	延迟 LMS 算法	339
6.3.8	LMS 算法的性质	340
6.4	自适应滤波器在 MATLAB 上的实现	343
6.4.1	自适应滤波器设计	344
6.4.2	各种自适应算法的仿真比较	345
6.4.3	自适应滤波器的量化问题	347
6.5	自适应滤波器的 C 语言程序实现	350
6.5.1	标准 LMS 算法的 C 语言程序实现	350
6.5.2	归一化 LMS 算法的 C 语言程序实现	351
6.5.3	泄漏 LMS 算法的 C 语言程序实现	351
6.5.4	符号-误差 LMS 算法的 C 语言程序实现	352
6.5.5	符号-数据 LMS 算法的 C 语言程序实现	352
6.5.6	符号-符号 LMS 算法的 C 语言程序实现	353
6.6	自适应滤波器在定点 DSP 上的实现	354
6.6.1	自适应滤波器在 TMS320C2x 上的实现	354

6.6.2	自适应滤波器在 TMS320C54x 上的实现	359
6.6.3	自适应滤波器在 TMS320C55x 上的实现	364
6.6.4	自适应滤波器在 TMS320C62x 上的实现	366
6.6.5	自适应滤波器在 TMS320C64x 上的实现	380
6.7	自适应滤波器在浮点 DSP 上的实现	382
6.7.1	自适应滤波器在 TMS320C3x 上的实现	382
6.7.2	自适应滤波器在 TMS320C67x 上的实现	387
6.8	小结	389
参考文献		390

第1章 绪 论

所谓数字信号处理,就是利用计算机或者专门的处理设备,以数值计算的方法对信号进行采集、变换、滤波、估值与识别等处理,从而达到提取信息和便于应用的目的。这一过程,既涉及数字信号处理(Digital Signal Processing)的理论和方法的研究,又涉及可编程的数字信号微处理器(Digital Signal Processor)的应用。它们的英文缩写都是 DSP,因此,数字信号处理技术又简称为 DSP 技术。

DSP 技术的内涵,决定了它是一门理论与实践并重的学科。微电子集成电路技术和工艺的迅猛发展,为复杂信号处理的实现,特别是实时实现,提供了可能,从而将数字信号处理的发展推向了一个又一个的高潮。从此,数字信号处理的研究,不仅限于一般理论和方法的探讨,也涉及越来越广泛的实际应用,新的实现方法与算法层出不穷。

在数字信号处理算法的实现过程中,DSP 处理器扮演着重要的角色。DSP 处理器是专门设计用来进行高速数字信号处理的微处理器。微处理器自 20 世纪 70 年代诞生以来,就一直沿着通用 CPU(如以奔腾系列为代表的 CPU)、微控制器 MCU(即单片机)和 DSP 这 3 个方向在发展。随着信息化和数字化的急速前进,DSP 的地位凸显了出来。与通用的 CPU 和微控制器 MCU 相比,DSP 处理器在结构上采用了许多专门技术和措施来提高处理速度^[1-7]。

目前,数字信号处理进入了一个新的发展时期,其应用的领域不断扩大,人们在理论和方法上探索的层次也更深更广。但是,一些传统的数字信号处理算法,如 FFT 算法、FIR/IIR 数字滤波算法、LMS 算法等,仍然发挥着至关重要的作用。首先,它们是现代信号处理的基础,是数字信号处理最重要的组成部分之一。其次,这些算法具有通用性,很多新的数字信号处理算法的关键模块都是由这些经典的算法构成的。因此,研究这些经典的,或者说通用的算法及其在 DSP 处理器上的高效实现方法,有着重要的意义。这也正是本书的主要内容和目的。

本章是全书的基础部分,介绍一些后面章节需要用到的基础知识。本章的第 1 部分简要介绍数字信号处理理论和方法的发展,以及本书将要讨论的通用数字信号处理算法。第 2 部分则介绍一些 DSP 处理器的基础知识,其中,重点介绍美国德州仪器公司(TI, Texas Instruments)的各系列 DSP,包括数据格式、硬件结构、软件结构、主要性能、评价标准及开发环境等。

1.1 数字信号处理的理论和方法

数字信号处理是一门涉及众多学科,又应用于众多领域的新兴学科。它一经问世,便吸引了很多学科的研究者,并把它应用于自己的研究领域。特别是 20 世纪 60 年代以来,随着信息科学和计算机科学的高速发展,数字信号处理已经成为发展最快和成效最为显著的新学科之一。它在通信、雷达、声呐、控制、生物医学工程、电力系统、航空航天、航海、自动化、仪器仪表、地震、图像、语音等众多领域都获得了极其广泛的应用。可以毫不夸张地说,

只要使用计算机和数据打交道,就必然要用到数字信号处理。

1.1.1 数字信号处理的优势

学习数字信号处理的第一步,是了解和模拟信号处理相比,数字信号处理有哪些优势。本节从处理方式上加以讨论^[1, 4]。

1) 精度高

在模拟系统中,信号处理的精度主要取决于元器件的精度。在数字信号处理器中,信号和描述处理运算的系统都用二进制的字表示。因此,在一定的范围内,需要的精度可以通过简单地增加字长来实现。此外,如果需要,信号和系统的动态范围,还可以通过使用浮点运算进一步得到扩大。

2) 抗干扰性好

在信号的处理和传输过程中,不可避免地会受到噪声的干扰。要在被干扰的模拟信号中完全去除噪声非常困难,甚至是不可能的。

数字信号抗干扰的性能大大优于模拟信号。如图 1-1 所示,尽管以 0 和 1 表征的数字信号也会受到噪声的干扰,但是,只要能够正确地识别 0 和 1 并将其再生,就可以完全消除噪声的影响。

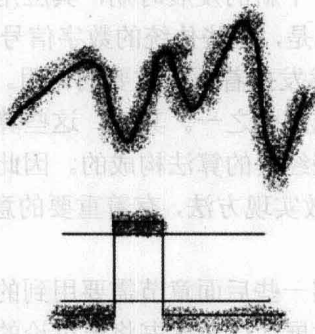


图 1-1 模拟信号和数字信号的抗噪声性能

另外,迅速发展的各种数字检错和纠错编解码技术,能够在极为复杂的环境噪声中,甚至在信号完全被噪声淹没的情况下,正确地识别和恢复原有的信号。

3) 灵活性好

当模拟系统的功能和性能发生改变时,必须重新进行系统设计,至少需要改变系统中的某些器件或参数,然后再重新装配和调试,这是非常费时和费力的。对于以 DSP 处理器为核心的数字系统而言,则可以只设计和实现一个硬件平台,然后用软件来执行各种各样的数字信号处理任务。需要改变系统的功能和性能时,只改变相应的软件或者软件中的参数即可,而不需要改变硬件平台本身。这就使以可编程 DSP 处理器为核心的数字信号处理系统具有极大的灵活性,这是传统的模拟系统无法比拟的。

例如, 数字信号处理可以通过时分复用来使大量的信号共享某个处理器, 从而降低每路信号的处理代价。考虑将两个数字信号通过时分复用合成一个信号。复用信号可以送入一个处理器, 在每个信号到达处理器输入端之前, 转换处理器的系数, 于是, 该处理器就可以看做是两个不同的系统。

近年来得到迅速发展和应用的软件无线电技术, 就是在一个以高性能 DSP 处理器为核心的硬件平台上, 用不同的软件来实现对不同工作模式的电台的通信。对于模拟电台而言, 只有完全相同的电台之间才能进行通信。

数字滤波器可以通过重新编程来完成低通、高通、带通和带阻等不同的滤波任务, 不需要改变硬件。而模拟滤波器则必须改变其设计并重新调试, 才能达到目的。

还有虚拟仪器等技术, 充分体现了以 DSP 处理器为核心的数字系统的灵活性。

4) 稳定性好

在模拟电路中, 电阻、电容、电感, 以及运算放大器等器件的特性, 都会随着环境的改变而改变, 也会随着时间的改变而改变。也就是说, 当时间改变和环境的温度、湿度、振动等条件改变时, 模拟系统的性能就会发生改变, 而且可能是非常大的改变。与之相比, 数字系统的稳定性要好得多, 即受时间和环境的影响要小得多。

5) 可重复性好

在模拟系统中, 由于生产工艺等因素, 分立元器件的性能与其标称性能有一定的误差。同样的元器件之间, 性能具有离散性。并且, 元器件性能还会随时间和环境条件的改变而改变。所以, 将同样的信号送入两个配置相同的模拟系统, 输出的结果可能会不一样。将同样的信号, 在不同的时间或不同的环境条件下, 送入同一个模拟系统, 输出的结果也可能不一样。在这一点上, 数字系统具有明显的优势。数字系统具有很好的可重复性, 两台字长相同的计算机, 在任何不同的时间, 计算同一个数学模型, 得到的结果一定是一样的。

6) 特殊应用

和模拟信号处理相比, 数字信号处理的优势还体现在它可以实现很多前者难以完成的特殊应用。

例如, 数字信号处理可以实现精确的线性相位和多抽样率处理。又如, 与模拟电路不同, 数字电路可以在没有负载匹配问题的情况下进行级联。还有, 数字信号处理可以在不同存储媒质中, 在不丢失信息的前提下, 几乎无失真地进行数据存储。而被存储的模拟信号随着时间的推移将迅速地被损坏, 而且不可能恢复出原有形式。

另外, 数字系统还可以具有自适应的特性。从信号与系统的角度讲, 自适应就是使系统的特性随输入信号的改变而改变, 从而在某种准则下, 得到最优的输出。例如, IP 电话中的回声会严重影响服务质量, 必须加以消除。但是, 回声的幅度和时延量随时都在改变, 只有使用自适应系统才能将其消除。就模拟系统而言, 只有改变系统的设计和元器件的参数, 才能改变系统的特性, 因而很难实现自适应。以 DSP 处理器为核心的数字系统, 已经成为实现各种自适应算法的首选系统。对于特定的自适应算法, 它能根据确定的准则, 实时地改变系统的参数, 从而实现实时自适应。对于不同的自适应算法, 只需要更换适当的软件即可。

数字系统还可以用于数据压缩。随着对信号质量的要求越来越高, 信号传输和存储的代

价也越来越高。虽然模拟信号的信息量也可以进行压缩,如限制信号的带宽等,但付出的代价是随着带宽的变窄,信号的质量将受到较大的影响。对数字信号的压缩则要有效得多。随着数字信号压缩算法的不断改进,已经可以在对源信号质量影响很小的前提下,取得很高的压缩比。

数字系统的另一个优点是可以处理频率非常低的信号,如地震监测中出现的信号。如果进行模拟处理,就要求电感和电容具有很大的物理尺寸,这是在实际应用中难以实现的。

7) 大规模集成

随着微电子科学与技术的发展,集成电路已经不再是数字电路的专利。近年来,出现了大量的模拟集成电路和模拟/数字混合集成电路,但从可选择的种类、集成度、功能、性能、性能价格比等诸方面而言,还是不能与超大规模数字集成电路相比。

本书所讨论的 DSP 处理器,就是基于超大规模数字集成电路技术和计算机技术而发展起来的、适合于做数字信号处理的高速高位微处理器。它们的一个显著特点就是体积小。除此之外,它们还有功能强、功耗小、使用方便灵活、性能价格比高等优点,从而得到了迅速的发展和广泛的应用。

8) 模拟信号处理的不可替代性

尽管数字信号处理有很多优点,但也有很多缺点和不足。因此,从根本上说,数字信号处理不能完全代替模拟信号处理,或者说,模拟信号处理仍然是不可缺少的。

(1) 自然界的信号,绝大多数是模拟的

首先,自然界的信号绝大多数仍然是模拟的,如声音、图像、温度、压力、速度等,这就决定了必须进行模拟信号处理。即便要对模拟信号进行数字处理,也必须首先用模拟系统和模拟/数字混合系统加以处理。

对模拟信号进行数字处理的过程如图 1-2 所示。首先,用模拟放大器对输入的模拟信号进行放大;再用模拟低通滤波器将其变成带限信号;经过抽样和保持电路及模数转换器(ADC, Analog-Digital Converter)将其变换成数字信号后,才能用数字信号处理器进行处理。处理之后,还要通过数模转换器(DAC, Digital-Analog Converter)将其变换成模拟信号,并通过适当的模拟信号处理,如滤波、放大等,才能加以使用。

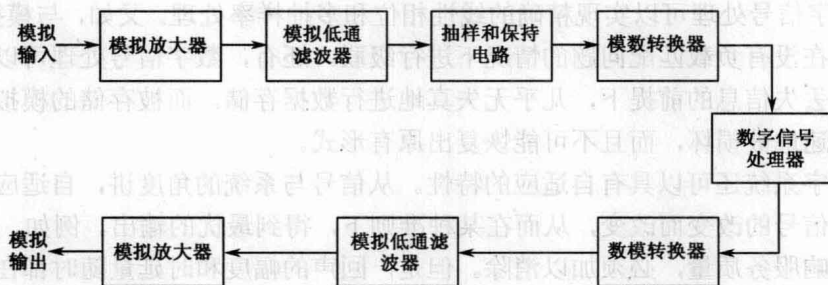


图 1-2 模拟信号数字处理框图

(2) 数字系统有效处理的频率范围有限

由抽样定理可知,对一个连续时间的模拟信号抽样的频率,必须是信号所含最高频率成分的两倍以上。如果不能满足该条件,那么,高于抽样频率一半的信号分量将发生交叠,使

信号失真。数字信号处理器能有效处理的频率范围,受到技术和工艺发展的限制,同时还受到抽样和保持电路及数模转换器的限制。

(3) 数字系统的实时性问题

很多的信号,要求所进行的处理必须是实时的,如通信、雷达、声呐、遥控遥测等。数字信号处理本质上是通过计算来实现的,尽管以 DSP 处理器为代表的数字信号处理系统的处理速度在很快地提高,但总会在很多情况下不能达到实时的要求。而模拟信号处理系统则不然,除系统引入的某些时延外,它们从根本上说是实时的。随着技术的进步,包括算法的改进和器件速度的提高,数字信号处理系统的处理速度在不断提高,能够进行实时处理的范围在不断地加大,但实时处理的要求也在不断地提高。因此,从实时处理的角度讲,用数字信号处理系统完全取代模拟信号处理系统,至少在目前还是不可能的。

(4) 数字系统的能耗问题

数字系统是由耗电的有源器件构成的,功耗较大。相反,大量模拟算法的实现可以用无源电路,其中采用不需要电源的电感、电容和电阻。另外,有源设备没有无源设备可靠。

(5) 数字系统难以处理射频(RF)信号

电磁波是一种重要的资源,从长波、中短波、超短波、微波、毫米波直到光波,人们都在广泛地加以利用。射频信号的发送和接收都是依靠模拟系统来完成的。因此,在发展数字信号处理技术的同时,射频技术也在积极快速地发展。

综上所述,模拟信号处理和数字信号处理必将长期共存。需要注意的是,在许多应用中,数字信号处理的优点远远超过缺点,而且随着数字信号处理器的发展,功能不断增加、速度不断提高,功耗和成本不断降低,数字信号处理的应用正在迅速发展。

1.1.2 数字信号处理理论的发展

1) 数字信号处理的起源

从某种意义上来说,数字信号处理技术的起源可以追溯到 17 世纪^[1]。当时,人们逐渐采用有限差分、数值积分,以及数字内插等方法来解决涉及连续变量和函数的物理问题。到了 20 世纪 50 年代,随着大型数字计算机的出现,数字信号处理开始兴起。最初的应用主要涉及模拟信号处理方法的仿真。大约在 20 世纪 60 年代初,数字信号处理逐渐发展成为一门独立的学科。

2) 传统的数字信号处理理论体系

数字信号处理把经典的理论体系(如数学、系统等)作为自己的理论基础,同时又使自己成为一系列新兴学科的理论基础,如人工智能、模式识别、神经网络等。在近半个世纪的发展过程中,数字信号处理自身已经基本上形成了一套较为完整的理论体系。这些理论主要包括^[3]:

- ① 信号的采集(A/D 技术、抽样定理、多抽样率、量化噪声分析等);
- ② 离散信号的分析(时域及频域分析、各种变换技术、信号特征的描述等);
- ③ 离散系统分析(系统的描述、系统的单位冲激响应、转移函数及频率特性等);
- ④ 信号处理中的快速算法(快速傅里叶变换、快速卷积和相关等);