

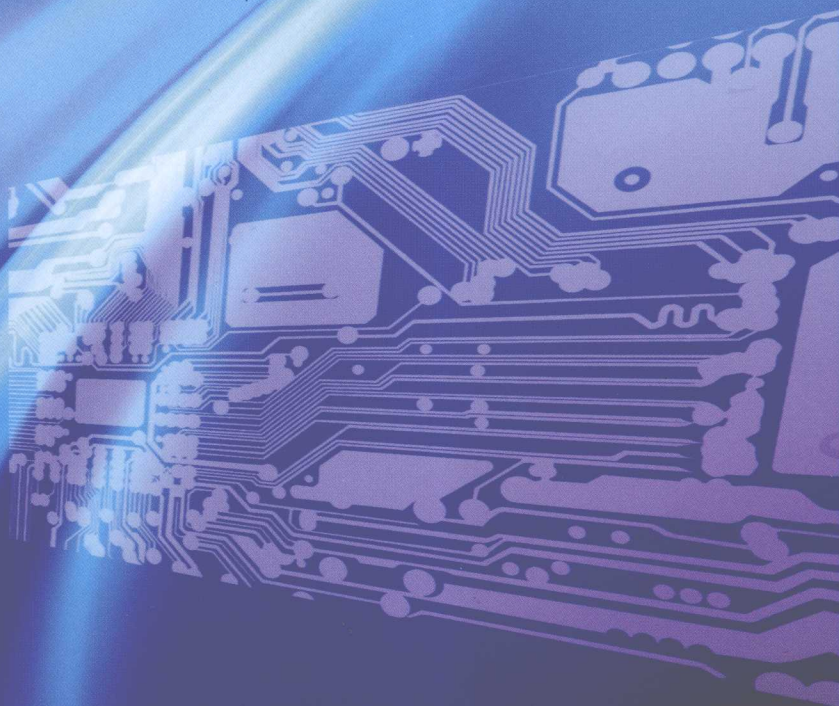
DSP

算法与体系结构

实现技术

DSP SUANFA
YU TIXI JIEGOU
SHIXIAN JISHU

许邦建 孙永节 唐涛 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

内 容 简 介

本书从开发者的角度出发,着重介绍DSP芯片的内部结构、主要性能、应用开发、系统结构、接口技术、开发工具、应用案例等。全书共分12章。第1章介绍DSP的发展概况、主要性能、应用开发、系统结构、接口技术、开发工具、应用案例等。第2章介绍DSP的内部结构、主要性能、应用开发、系统结构、接口技术、开发工具、应用案例等。第3章介绍DSP的内部结构、主要性能、应用开发、系统结构、接口技术、开发工具、应用案例等。第4章介绍DSP的内部结构、主要性能、应用开发、系统结构、接口技术、开发工具、应用案例等。第5章介绍DSP的内部结构、主要性能、应用开发、系统结构、接口技术、开发工具、应用案例等。第6章介绍DSP的内部结构、主要性能、应用开发、系统结构、接口技术、开发工具、应用案例等。第7章介绍DSP的内部结构、主要性能、应用开发、系统结构、接口技术、开发工具、应用案例等。第8章介绍DSP的内部结构、主要性能、应用开发、系统结构、接口技术、开发工具、应用案例等。第9章介绍DSP的内部结构、主要性能、应用开发、系统结构、接口技术、开发工具、应用案例等。第10章介绍DSP的内部结构、主要性能、应用开发、系统结构、接口技术、开发工具、应用案例等。第11章介绍DSP的内部结构、主要性能、应用开发、系统结构、接口技术、开发工具、应用案例等。第12章介绍DSP的内部结构、主要性能、应用开发、系统结构、接口技术、开发工具、应用案例等。

许邦建 孙永节 唐涛 编著

第1章 DSP的发展概况

1.1 DSP的发展概况

1.2 DSP的主要性能

1.3 DSP的应用开发

1.4 DSP的系统结构

1.5 DSP的接口技术

1.6 DSP的开发工具

1.7 DSP的应用案例

1.8 DSP的内部结构

1.9 DSP的主要性能

1.10 DSP的应用开发

1.11 DSP的系统结构

1.12 DSP的接口技术

1.13 DSP的开发工具

1.14 DSP的应用案例

1.15 DSP的内部结构

1.16 DSP的主要性能

1.17 DSP的应用开发

1.18 DSP的系统结构

1.19 DSP的接口技术

1.20 DSP的开发工具

1.21 DSP的应用案例

1.22 DSP的内部结构

1.23 DSP的主要性能

1.24 DSP的应用开发

1.25 DSP的系统结构

1.26 DSP的接口技术

1.27 DSP的开发工具

1.28 DSP的应用案例

1.29 DSP的内部结构

1.30 DSP的主要性能

1.31 DSP的应用开发

1.32 DSP的系统结构

1.33 DSP的接口技术

1.34 DSP的开发工具

1.35 DSP的应用案例

国防工业出版社

地址:北京市海淀区中关村大街22号 邮编:100080 电话:010-68417323

发行:010-68417323 经销:010-68417323 印刷:010-68417323

内 容 简 介

本书主要依据数字信号处理的原理和一些经典算法,并结合作者多年从事“计算机和集成电路设计”专业“数字信号处理”研究生课程的教学体会,以及多年从事实际 DSP 芯片设计的研究成果,来讨论数字信号处理的各种算法原理及其对应 VLSI 和 DSP 处理器硬件实现时的结构问题。其中包括数字信号处理主要常见算法的原理、数字信号处理算法到硬件实现之间的转换和映射、VLSI 和 DSP 实现的逻辑和结构设计等。

本书特别适合于电子、计算机、集成电路设计、自动控制等专业有关教师、研究生、本科生和技术人员教学、自学、进修之用。

图书在版编目(CIP)数据

DSP 算法与体系结构实现技术 / 许邦建, 孙永节, 唐涛编著.
—北京: 国防工业出版社, 2010. 1
ISBN 978-7-118-06497-1

I. D... II. ①许... ②孙... ③唐... III. ①数字信号-信号
处理②数字信号-微处理器 IV. TN911.72 TP332

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 130983 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

腾飞印务有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 18 字数 412 千字

2010 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 32.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

数字信号处理理论和实现技术是现代电子科学技术的重要基础。

国内目前已经出版了很多深受读者喜爱的数字信号处理理论和算法方面的书籍。与国内外已出版的同类书籍比较,本书试图从一些新的视角来阐述 DSP 的问题。这些新视角包括:

(1)全面融入 DSP 体系结构的知识。

对于非电子专业的学生来说,过强的理论阐述不仅难以激发他们的学习兴趣,反而会让他们对 DSP 知识望而生畏。本书将数字信号处理的算法原理与实际 DSP 电路设计实现结合起来考虑,摆脱了国内同类著作一般只讨论算法,而未能将算法与其 DSP 硬件实现技术结合起来讨论的缺点。对于计算机和集成电路设计专业的学生而言,很容易将计算机体系结构的知识与本书的内容结合起来。因此,本书中的知识系统性较强,特别适合于从事数字信号处理 ASIC 芯片和 DSP 研究和开发的人员阅读。

(2)比较全面的算法介绍。

目前,国内外出版的数字信号处理著作的内容范围普遍比较窄,一般只包含了理论基础、DFT 理论和算法、数字滤波器设计这几个方面。但实际上,数字信号处理是一门实践性学科,读者迫切希望了解常见的视频、通信等方面的常见算法。特别是计算机、自动控制等非电子专业的读者,更希望这类书能比较全面、浅显易懂地描述各种典型应用算法。因此,本书在内容方面除了增加国内外同类书籍都缺乏的算术算法(从事 VLSI 数字信号处理系统设计人员特别需要补充此类算法知识)之外,又着重增加了快速信号处理算法、视频处理算法、DSP 关键部件的实现算法这几类工程技术人员和相关专业本科、研究生迫切希望了解的典型算法知识。

(3)写作特点。

本书的写作遵循浅显易懂的大原则。考虑到最大范围读者的情况,本书对于各种理论和算法的介绍都简单扼要,不会纠缠于深奥的理论分析和推导,以最大程度地降低阅读的难度。

目 录

第1章 DSP 技术概论	1
1.1 信号处理学科的历史、现状与未来	1
1.1.1 通信中的数字信号处理	4
1.1.2 话音处理中的数字信号处理	5
1.1.3 回波定位中的数字信号处理	6
1.2 数字信号处理技术的概念及其发展	6
1.3 DSP 技术的优势	7
1.4 DSP 的主要结构特点	8
1.5 专用 DSP	9
1.5.1 高性能通用数字信号处理器	9
1.5.2 专用指令集处理器	10
1.5.3 现场可编程门阵列	11
1.5.4 阵列数字信号处理器	11
1.5.5 嵌入式向量处理器	13
1.5.6 流处理器	13
1.5.7 专用数字信号处理器比较	14
1.6 小结	15
参考文献	15
第2章 DSP 的基本理论	19
2.1 离散时间信号	19
2.2 离散时间系统	19
2.3 脉冲响应及卷积的概念	20
2.4 差分方程	21
2.5 连续时间信号的采样	22
2.5.1 相关理论	22
2.5.2 采样定理	22
2.6 z 变换	24
2.6.1 z 变换的来源及定义	24
2.6.2 z 反变换	26
2.6.3 z 变换的性质	26
2.6.4 传输函数	28
2.7 傅里叶变换	28
2.7.1 系统的频率响应	28

2.7.2	离散信号傅里叶变换的概念	29
2.7.3	离散信号傅里叶变换的性质	29
2.8	数字信号处理系统的模拟接口问题	30
2.9	抗混叠滤波器	31
2.10	抽样率选择和混叠控制举例	32
2.11	过抽样和 ADC 分辨力问题	33
2.12	小结	34
	参考文献	34
第3章	DSP 中的经典数字滤波算法	36
3.1	概述	36
3.1.1	滤波原理	36
3.1.2	理想数字滤波器	37
3.2	FIR 数字滤波器的设计	38
3.2.1	线性相位 FIR 滤波器	38
3.2.2	FIR 滤波器的设计方法——频率取样法	41
3.2.3	FIR 滤波器的设计法——窗函数法	42
3.2.4	FIR 滤波器的优化设计方法	46
3.2.5	FIR 滤波器设计方法的 Matlab 实现	50
3.3	IIR 数字滤波器的设计	50
3.3.1	模拟滤波器的设计	51
3.3.2	模拟滤波器到数字滤波器的变换	56
3.3.3	IIR 滤波器的数值优化设计方法	58
3.3.4	IIR 滤波器设计方法的 Matlab 实现	58
3.4	小结	59
	参考文献	59
第4章	DSP 中的现代数字滤波算法	60
4.1	概述	60
4.2	自适应线性组合器	60
4.3	LMS 自适应算法	61
4.3.1	LMS 算法的性能函数	61
4.3.2	LMS 算法中的梯度与最小均方误差	62
4.3.3	LMS 算法中性能表面的搜索	63
4.3.4	LMS 自适应算法	63
4.4	RLS 自适应算法	64
4.4.1	线性最小二乘滤波器的概念	64
4.4.2	线性最小二乘的数据加窗问题	65
4.4.3	线性最小二乘的正则方程解	66
4.4.4	时间平均相关矩阵的性质	67
4.4.5	线性最小二乘的完全矩阵求解	67

95	4.4.6 线性最小二乘求解的奇异值分解算法	67
95	4.4.7 RLS 滤波器的原始概念	68
92	4.4.8 基本 RLS 算法	68
12	4.4.9 基于 LDU 分解的改进 RLS 算法	71
56	4.4.10 基于 QR 分解的改进 RLS 算法	72
12	4.5 自适应信号处理的应用	78
42	4.6 小结	79
42	参考文献	79
	第 5 章 DSP 中的快速算法	81
92	5.1 卷积运算的快速算法	81
92	5.1.1 卷积的基本原理与定义	81
52	5.1.2 卷积的时域快速算法	81
32	5.2 DFT 运算	84
82	5.2.1 DFT 的概念及定义	84
12	5.2.2 DFT 的性质	86
54	5.2.3 利用 DFT 实现线性卷积的频域计算	87
04	5.3 快速傅里叶变换算法	88
02	5.3.1 递归型 FFT 算法	88
02	5.3.2 基于快速卷积算法的 FFT 算法	97
52	5.3.3 实现的 DFT 和 FFT 的相关 Matlab 语句	99
92	5.3.4 FFT 算法的电路实现	99
82	5.4 DCT 的快速算法	99
82	5.4.1 概述	99
22	5.4.2 一维 DCT 的定义及其性质	100
22	5.4.3 二维 DCT	103
08	5.5 多速率信号处理算法	106
08	5.5.1 概述	106
00	5.5.2 相关基本理论	107
18	5.5.3 多采样率系统的实现结构	109
18	5.6 小结	113
58	参考文献	113
	第 6 章 DSP 中的算法表示及 VLSI 结构	114
60	6.1 流水技术概述	114
40	6.2 数字信号处理算法的表示及优化	115
40	6.2.1 数字信号处理算法的图形化表示问题	115
50	6.2.2 基于数据流图的数字信号处理算法优化	117
00	6.3 VLSI 流水处理结构	119
50	6.4 VLSI 并行处理结构	120
50	6.4.1 脉动阵列结构	121

6.4.2	波前阵列结构	125
6.5	经典数字滤波运算的 VLSI 实现结构	126
6.5.1	FIR 滤波算法的电路实现	126
6.5.2	FIR 滤波器电路实现	127
6.5.3	FIR 系统的一般实现结构	128
6.5.4	IIR 系统的一般实现结构	131
6.5.5	数字滤波运算的格型实现结构	133
6.6	小结	136
	参考文献	136
第 7 章	DSP 中的算术算法	138
7.1	经典的数值系统	138
7.1.1	二进制数字系统	138
7.1.2	m 数值的机器表示	138
7.1.3	负数的表示	138
7.2	非传统的固定基数值系统	139
7.2.1	负基数系统	140
7.2.2	符号位数值系统	140
7.2.3	二进制的 SD 数字	141
7.2.4	分布式运算	143
7.3	快速加法算法	144
7.3.1	基本的行波进位加法器	144
7.3.2	基本的分组超前进位加法器	145
7.3.3	一般化的超前进位加法器	146
7.3.4	并行前缀加法器	147
7.3.5	进位选择加法器	150
7.3.6	进位保留加法器与累加树	150
7.4	乘/除法的基本顺序算法	154
7.4.1	顺序乘法算法	154
7.4.2	顺序除法算法	156
7.4.3	不恢复除法算法	157
7.4.4	基本的开方算法	158
7.5	高速乘法算法	160
7.5.1	减少部分积数目的加速算法	160
7.5.2	阵列乘法结构	162
7.5.3	树型乘法结构	163
7.6	快速除法	169
7.6.1	SRT 除法	169
7.6.2	高基数除法	170
7.7	对数算术数值系统	170
7.7.1	对数算术算法原理	170

7.7.2	传统数值与对数数值的转化	171
7.8	余数数值系统	172
7.8.1	余数数值原理	173
7.8.2	余数数值系统的算术操作	173
7.8.3	混合基数数值系统	173
7.8.4	余数系统数值转换	174
7.8.5	二进制数值转为余数数值	174
7.9	算法中的有限字长问题	174
7.10	小结	176
	参考文献	176
第8章 DSP 中的指令系统		178
8.1	DSP 指令集	178
8.1.1	概述	178
8.1.2	DSP 中的加减法指令	178
8.1.3	DSP 中的乘除法指令	179
8.1.4	DSP 中的其他算术指令	180
8.1.5	DSP 中的逻辑运算指令	181
8.1.6	移位运算指令	182
8.1.7	比较指令	183
8.1.8	最大最小指令	183
8.1.9	位操作指令	183
8.1.10	栈控制指令	184
8.1.11	分支指令	185
8.1.12	调用和返回指令	185
8.1.13	循环指令	185
8.1.14	传送指令	186
8.1.15	其他操作指令	186
8.2	DSP 的指令控制	186
8.2.1	概述	186
8.2.2	程序地址产生逻辑	187
8.2.3	程序控制逻辑	188
8.2.4	硬件循环控制逻辑	189
8.2.5	条件计算逻辑	190
8.2.6	中断处理逻辑	190
8.2.7	流水线控制逻辑	191
8.3	小结	193
	参考文献	193
第9章 DSP 中的关键计算部件		195
9.1	地址计算部件	195
9.1.1	CPU 寻址机制概述	195

9.1.2	DSP 中的专用寻址机制	196
9.1.3	DSP 地址计算部件结构	199
9.2	乘累加部件	200
9.2.1	概述	200
9.2.2	乘累加单元的实现结构	200
9.3	移位部件	201
9.3.1	概述	201
9.3.2	桶形移位结构	202
9.3.3	对数移位结构	203
9.3.4	Funnel 移位结构	204
9.3.5	基于选择开关的数据反转移位结构	204
9.3.6	基于掩码的数据反转移位结构	204
9.3.7	基于掩码的补码桶形移位结构	206
9.3.8	基于掩码的反码桶形移位器	207
9.4	小结	207
	参考文献	207
第 10 章	DSP 中的典型接口部件	211
10.1	面向话音信号处理的串行接口部件	211
10.1.1	概述	211
10.1.2	DSP 片上串口的发展趋势	212
10.1.3	与 DSP 串口通信的其他串行设备	215
10.1.4	关键实现结构	219
10.2	外部存储器接口部件	224
10.2.1	概述	224
10.2.2	外部存储器接口功能	225
10.2.3	外部存储器接口与 CPU 的接口	227
10.2.4	外部存储器接口的内部结构	229
10.2.5	关键实现结构	230
10.3	小结	234
	参考文献	234
第 11 章	面向图像信号处理的 DSP 结构	236
11.1	概述	236
11.2	SIMD 加法部件	237
11.2.1	SIMD 加法部件的功能	237
11.2.2	SIMD 加法部件的实现结构	238
11.2.3	SIMD 加法器的电路设计	240
11.3	SIMD 移位部件	245
11.3.1	SIMD 移位部件的功能	245
11.3.2	SIMD 移位器的实现结构	247
11.3.3	Barrel shifter 模块的实现	248

11.3.4	Sfix 模块的实现	249
11.3.5	Ssign 模块的设计	249
11.3.6	unorpack 模块的实现	249
11.3.7	Pfix 模块的实现	250
11.3.8	Psign 模块的设计	250
11.4	SIMD 乘法部件	251
11.4.1	SIMD 乘法部件的功能	251
11.4.2	16 位混合乘法器的实现结构	251
11.5	小结	254
	参考文献	254
第 12 章	面向视频信号处理的 DSP 结构	257
12.1	视频编码基本理论与技术	257
12.1.1	视频编解码的国际标准	257
12.1.2	主要视频编码算法	258
12.1.3	典型视频编码算法	260
12.1.4	典型视频解码算法	264
12.2	视频编码算法的 DSP 优化	268
12.2.1	SIMD 扩展指令	269
12.2.2	视频处理专用指令	270
12.3	视频解码算法的 DSP 优化	270
12.3.1	可变长解码部件	271
12.3.2	IDCT 部件	272
12.3.3	运动补偿单元	273
12.4	小结	274
	参考文献	274

第1章 DSP 技术概论

1.1 信号处理学科的历史、现状与未来

信号处理是一门横跨多门学科的技术,其中包括通信、雷达、地质探测等。高级信号处理算法和硬件随处可见,包括军用电子设备、家用电器等。总的来说,当今的技术趋势是通信、计算机和信号处理日益融为一体。

信号处理关注的是信号及其所包含信息的表示、变换和运算。例如,分开两个混在一起的信号,或者想增强某些信号分量等。

在 20 世纪 60 年代之前,信号处理手段都是连续时间的模拟技术。之后,随着数字计算机、微处理器、集成电路技术的飞速发展,连同快速傅里叶变换技术等理论成果,导致数字信号处理领域出现了。

数字信号处理的一个基本特点是它处理的对象是数字化的离散样本序列。一个更广泛的概念是“离散时间信号处理”,它指的是拥有无限精度的离散样本序列。实际上,“离散时间信号处理”和“数字信号处理”之间有区别,但也有联系。一个连续时间模拟信号必须先转换为离散时间信号,然后编码量化为数字信号。因此,也可以说,离散时间信号是模拟信号数字化过程的中间结果。

大多数传统的信号处理都是为了得到一个信号成分而处理另一个信号,但现在越来越多的信号处理问题是“信号分析”。在“信号分析”问题中,处理的目的是为了得到一个输出信号,而是要得到输入信号的某个特征。

信号处理问题并不仅限于一维信号。例如,许多图像处理的应用问题需要用到二维信号处理技术,如医学图像、卫星照片等。本书对多维信号处理问题不会多加论述,有兴趣的读者请参考有关资料。

多维信号处理仅仅是信号处理学科在近代发展出的众多学科分支中的一个。实际上,现代信号建模和谱估计理论,也是近代信号处理理论领域发展出来的重要成果。另一个非常重要的近代论题是自适应信号处理。自适应系统具有广泛的应用,而且对它们的分析与设计已建立了一套很有效的方法。这些方向仅仅代表了信号处理科学领域众多近代论题中的几个方面,其他还包括很多领域。

离散时间信号处理以不寻常的步伐走过了很长一段历史时期。直到 20 世纪 50 年代初,信号处理还是用模拟系统来完成,实现这些模拟系统多是用电子线路,甚至还有用机械装置的。即使当时已经出现了电子计算机,但其计算能力非常有限,体积非常庞大,价格非常昂贵。随着数字信号处理理论的发展,人们越来越倾向于采用复杂的信号处理算法,而这些算法是不能或难于用模拟装置实现的。这种想法要想变为现实,需要两个条件,即计算能力很强的计算机和高效的快速算法。自 20 世纪 80 年代以来,计算机的计算

能力一直都在快速增长。与此同时,计算机的小型化、微型化也在快速发展。这就为问题的解决提供了很好的硬件基础。在数字信号处理高效算法方面,Cooley 和 Tukey 提出的计算傅里叶变换的快速算法,是数字信号处理理论领域一个划时代的突破,它为数字信号处理实时化、嵌入化提供了强有力的理论基础。具体来说,快速傅里叶变换算法将傅里叶变换的计算时间减少了几个数量级,使得一些复杂的数字信号处理算法能够实时实现。另一方面,快速傅里叶变换算法可以用专用数字硬件实现,这就使微型化的嵌入式数字信号处理系统成为可能。快速傅里叶变换算法的发现,还激发了人们用离散时间数学方法来重新形成信号处理概念和算法的兴趣。

就这门知识在大学中的地位来说,它也经历了一个变化的过程。在 20 世纪 80 年代早期,数字信号处理理论一般作为电子工程专业的研究生课程;到 20 世纪 90 年代,它已经成为本科生的必修课程;今天它已经在很多领域成为科研工作者的基本技能。

数字信号处理理论和技术的发展,还得益于微电子领域的飞速发展。自 20 世纪 80 年代以来,数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)芯片的复杂性和先进程度也在不断提高。这就为实现更复杂、更快速、更微型化的数字信号处理系统提供了可能性。

DSP 芯片诞生于 20 世纪 70 年代末,至今已经得到了突飞猛进的发展,并经历了以下四个阶段。

第一阶段,DSP 的理论和雏形阶段(20 世纪 70 年代)。在 DSP 芯片出现之前,数字信号处理只能依靠通用微处理器来完成,但是通用微处理器较低的数字信号处理速度和高能耗无法满足数字信号处理高速实时的要求。在 20 世纪 70 年代中期,Cooley 和 Tukey 发表了著名的快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)算法,极大地降低了傅里叶变换的计算量,从而为数字信号的实时处理奠定了算法的基础。这个时期的 DSP 芯片由于内部没有专门的单周期硬件乘法器,使芯片的运算速度、数据处理能力和运算精度受到了很大的限制,其应用仅局限于军事、航空航天等领域。

第二阶段,DSP 的初步发展阶段(20 世纪 80 年代)。随着大规模集成电路技术的发展,1982 年 TI 公司推出了其第一代 DSP 芯片 TMS32010。这种 DSP 芯片采用微米 NMOS 工艺制造,虽然功耗和尺寸比较大,但是它采用了改进的哈佛结构,允许数据在程序存储空间与数据存储空间之间传输,大大提高了运行速度和编程灵活性,在语音合成和编码解码器中得到了广泛的应用。DSP 从概念走向了产品,TMS32010 所表现出来的出色性能和特性备受业界的关注。到了 20 世纪 80 年代中期,随着 CMOS 技术的进步与发展,第二代基于 CMOS 工艺的 DSP 芯片应运而生,其存储容量和运算速度都得到成倍提高,成为语音处理、图像硬件处理的基础构件。

第三阶段,DSP 的成熟阶段(20 世纪 90 年代)。这个时期,国际上许多著名的集成电路厂家都相继推出自己的 DSP 产品。例如, TI 公司的 TMS320C20、TMS320C30、TMS320C40、TMS320C50 系列,摩托罗拉公司的 DSP5600 系列, AT&T 公司的 DSP32 等。这个时期的 DSP 芯片在硬件结构上更适合于数字信号处理的要求,能进行硬件乘法、硬件 FFT 和单指令滤波处理,其运算速度进一步提高,其应用范围逐步扩大到通信、计算机领域。到了 20 世纪 90 年代中后期,DSP 芯片具有的主要特点是较高的时钟频率,同时增加了一些功能单元(如桶形移位器等)和采用了较深的流水线设计(一般都超过 5 级流水),并引入了低功耗设计技术等。典型的产品是 ADSP-219x, TMS320C54x 等。

第四阶段,DSP 的完善阶段(2000 年以后)。这一时期的 DSP 芯片不仅信号处理能力更加完善,而且使系统开发更加方便,程序编辑调试更加灵活,功耗进一步降低,成本不断下降,系统集成度更高,大大提高了数字信号的处理能力。它另外一个最大的特点是实现了指令的多发射,一般采用超长指令字(VLIW)结构,还有一些采用单指令多数据流(SIMD)结构,其时钟频率高达 1GHz,可在 Windows 环境下直接用 C 语言编程。这不仅使 DSP 芯片在通信、计算机领域得到了广泛的应用,而且逐渐渗透到人们日常消费领域。

目前,DSP 芯片普遍采用 $0.25\mu\text{m}$ 至 $0.065\mu\text{m}$ 的 CMOS 工艺,芯片引脚从原来的 40 多个增加到 200 个以上,需要设计的外围电路越来越少,成本、体积和功耗不断下降。DSP 芯片的片内程序和数据存储器的容量达几十兆字节以上,而片外程序存储器和数据存储器的可用空间达到吉字节数量级。现在的 DSP 芯片内部均采用多总线、多处理单元和多级流水线结构,加上完善的接口功能,使 DSP 的系统功能、数据处理能力和与外设的通信能力都有了很大的提高。近 20 年的发展,使 DSP 的指令周期从 400ns 缩短到 10ns 以下,其相应的速度从 2.5 兆指令/s 提高到 2000 兆指令/s 以上。

DSP 芯片技术的发展,主要围绕三个因素展开,即性能(Performance)、功耗(Power Consumption)和价格(Price)。总的说来,随着超大规模集成电路(VLSI)技术的高速发展,现代 DSP 芯片在价格显著下降的同时,仍然保持性能的不断提升和单位运算量功耗的不断降低。但是,DSP 继续面临的要求是处理速度更高,性能更多、更加全面,功耗更低,存储器用量更少。所以,DSP 芯片将会有以下一些发展趋势。

(1) DSP 走向“多核”与(Systems on Chip, SoC)。DSP 的“多核”发展趋势可以从广度和深度两个方面进行分析。从广度上讲,DSP 的“多核”是指 DSP 的型号或者说是面向不同类型的应用越来越多。如 TMS320C6000 系列面向最高性能,TMS320C5000 系列面向高性能与低功耗相结合,TMS320C2000 系列面向结合类似 MCU 的控制功能与 DSP 的高性能等。从深度上讲,DSP 的“多核”是指一个 DSP 中集成了多个 DSP 核。在当今面向高速、高密度数据信号处理应用中,多 DSP 的融合十分具有必要性。如 TI 公司在最近公布的无线基础设施的多核 DSP 中,已经有一款 6 核方案,并计划在未来的 25 年内推出一个将集成百个处理器的 DSP 芯片。然而对于那些不属于高密度的应用,DSP 将来的发展方向是 SOC。SOC 集成系统将在系统处理器的控制下,同时使用可编程 DSP 和相应的硬件加速器。近来国际上流行的达芬奇(DaVinci)平台就是一个 SOC 的典型例子,它采用了 DSP 和 ARM 双核结构,以及视频前端和视频加速器,专门针对数字视频的应用而设计。

(2) DSP 越来越快。DSP 越来越快是指 DSP 的运算速度越来越快,指令的执行时间越来越短,频率越来越高,功能越来越强。DSP 芯片要在不提高时钟频率和显著改变硬件的条件下改善其性能,就必须使其在每一个时钟周期内做更多的工作。一种方法是通过增加片上运算单元的个数以及相应的连接这些单元的总线数目,就可以成倍地提升芯片的总体运算能力。另一种方法是使用“并行”的结构。并行执行多条指令的 DSP 芯片的结构又分为两类,即超长指令字和超标量(Superscalar)结构。

(3) DSP 越来越小。高集成度也是 DSP 芯片的发展趋势之一。在通信领域为了用低功耗的小型器件进行高水准的调制和解调算法处理,已经开发出包含有 DSP 内核电路的单片算法集成电路。当今随着微细化工艺技术的不断发展,在更多地采用 $0.065\mu\text{m}$ 的 CMOS 工艺之后,集成度将会得到进一步的提高,而电压和功耗将会进一步降低,从而能

够在保证 DSP 芯片功能多样化的同时,体积和面积不断减小。为了进一步缩小 DSP 芯片的体积,科学家们正在研制一系列的采用非硅材料制造的芯片,例如砷化镓(GaAs)芯片、锗(Ge)芯片以及硅锗(SiGe)芯片等。这些非硅 DSP 芯片的体积更小巧,能够用来制造轻、薄、短、小的数字通信设备。

(4) DSP 存储器架构的变化。随着 DSP 芯片主频的不断提高,存储器的访问速度日益成为系统性能提升的瓶颈。在现有的制造工艺下,片上存储单元的增加将导致数据线负载电容的增加,影响到数据信号的开关时间和增加整个芯片的功耗,这意味着片上高速存储单元的增加将是十分有限的。为了解决存储器速度与 CPU 内核速度不匹配的问题,新的 DSP 芯片采用了多级高速缓存(Cache)机制,如 TI 的 C64x DSP 就采用了两级 Cache 结构。研究表明,在很多情况下,采用这种多级缓存架构可以达到采用完全片上存储器结构系统的约 80% 的执行效率。但是,采用 Cache 机制也在一定程度上增加了系统执行时间的不确定性,其对于实时系统的影响需要用户认真地加以分析和评估。

(5) 定点可编程 DSP 芯片。可编程 DSP 给生产厂商提供了很大的灵活性。生产厂商可在同一个 DSP 平台上开发出各种不同型号的系列产品,以满足不同用户的需求。同时,可编程 DSP 也为广大用户提供了易于升级的良好途径。从理论上讲,虽然浮点 DSP 的动态范围比定点 DSP 大,且更适合于 DSP 的应用场合,但定点运算的 DSP 器件的成本较低,对存储器的要求也较低,而且功耗较低。因此,定点运算的可编程 DSP 器件仍是市场上的主流产品。

(6) DSP 功耗越来越低。新一代消费性商品和宽带通信是 DSP 技术最重要的应用市场,其中大多数产品采用电池供电,并需要有尽可能长的使用时间。DSP 芯片是这些产品的核心器件,它的功耗将会越来越低。针对 DSP 功耗的变化趋势,存在一个 Gene 定律。Gene 定律认为,DSP 的功耗性能比每隔 5 年将降低为原来的 1/10。

进入 21 世纪后,DSP 芯片将向着高性能、低功耗、加强融合和拓展多种应用的趋势发展,DSP 芯片将越来越多地渗透到各种电子产品当中,成为各种电子产品尤其是通信类电子产品的技术核心。面对新世纪的网络产品、消费类电子产品以及无线通信等领域不断涌现的新应用,DSP 芯片在不断地提高性能和增加功能的同时,正在不断地降低功耗和减小体积,以便适应市场的需求。

1.1.1 通信中的数字信号处理

在通信领域,数字信号处理理论大有用武之地,这里只讨论三种典型应用。

1. 多路复用

直到 20 世纪 60 年代,两部电话如果要通话,就必须通过机械开关和放大器将它们通过物理线路连接在一起。

在数字信号处理技术发展起来之后,已经将模拟话音信号转换为一串数字流。既然单个数据位可以很容易地插入到一个大的数据流中,就可以在单条线路上同时实现多个通话。

例如,在著名的 T 载波电话系统中,能够同时传送 24 路话音。通过使用 8 位压缩采样,每路话音信号被每秒采样 8000 次。这样,每路话音信号的数据速率变为 64kb/s。所有 24 路总的的数据速率为 1.544Mb/s。为了传送这 1.544Mb/s 信号,只需使用 22 号标准

铜线。从这里就可以看到使用数字信号处理技术给电话网络带来的巨大的费用节省。

2. 数据压缩

每路话音信号虽然每秒采样 8000 次,但其实其中还含有很多冗余信息。为了进一步压缩传送话音信息所需传送能力需求,人们发展出了很多种数据压缩算法。这些算法压缩量不同,对应最后的话音质量也不同。一般说来,将每路话音信号的数据率从 64kb/s 压缩到 32kb/s,不会对话音质量造成多大损失;如果压缩到 8kb/s,语音质量会受到很大影响,但还可听清;如果压缩到 2kb/s,则话音质量会很差,但对于军用和海底通信还有用处。

3. 回声控制

在长途电话系统中,回声是个很严重的问题。数字信号处理技术怎样解决这个问题呢?首先检查回声信号,然后产生一个对应的反信号来抵消该回声信号。

另外,该技术也可用于减少环境噪声。

1.1.2 话音处理中的数字信号处理

听觉是人类非常重要的感觉来源,在这里只讨论数字信号处理技术给音乐和话音这两大领域带来的变化。

1.1.2.1 音乐

从歌唱家的麦克风到歌迷的扬声器,音乐需要走过很长的路径,其中既包括音乐的保存,也包括音乐的复制。

怎么才能在这个漫长过程中保持原有的音质呢?这对于原有的模拟系统是一个非常大的挑战。

为了解决这一难题,人们用数字方式来记录音乐。一般而言,人们在对音乐录音时,是在录音室进行,并且数据是按照多个通道记录。在一些情况下,人们甚至将歌唱家的声音和乐器的伴奏音各自单独地进行记录。这种方式被称为“音响合成”,它可以给音响师更大的灵活度以创造最终的产品。数字信号处理技术可以在音响合成方面起很大的作用,包括滤波等,其中一个很重要的应用是“人工混响”。

之所以有人工混响,是因为如果直接将各个单独的通道信号简单叠加在一起,则最终的效果将很差(特别像音乐家在野外演出)。其中的原因是人们需要音乐中的回声和混响,而这些成分在各个通道单独录音时都被尽可能地屏蔽了。

为了解决这一问题,可以使用数字信号处理技术来人工产生回声和混响。

1.1.2.2 话音

1. 话音合成

计算机合成话音通常有两种办法,即数字记录和声道模拟。

在数字记录方式下,真人的声音以数字化的方式被记录下来(通常会被压缩)。在回放过程中,存储的数据被解压缩,然后变为原始的模拟信号。一个小时的声音记录大约需要 3M 字节的存储空间。声道模拟比较复杂,它是通过模仿人类声道的物理机制来发音。

2. 话音识别

人类话音自动识别的难度比话音合成大得多,训练计算机听懂话音非常困难。

为了实现话音识别的目的,可以利用数字信号处理技术。其中主要包括两大步骤,即

特征提取和特征匹配。

输入话音信号的每个单词都会被隔离开来,然后被计算机分析,以决定激励和谐振的频率。这些提取出来的参数将与以前单个单词的样本进行对比,以决定最接近的匹配。

话音识别系统通常仅能识别几百个单词;仅能接受单词之间声音间隔较大的输入话音;对于不同的发声者必须重新训练。但这对通常的商业应用来说已经足够了。

1.1.3 回波定位中的数字信号处理

为获得远处一个目标的信息,一个通常的办法是观察它的一个散射波。这里数字信号处理技术已经发挥了极大的作用。

1. 雷达

在最简单的雷达系统中,一个无线电发送装置将向目标发送一个时间很短的无线电脉冲。通过测量目标回波和发射波之间的时间差,就可以计算出目标的距离。

雷达系统的作用距离由两个因素决定,即初始发射脉冲所包含的能量以及接收脉冲的噪声水平。但增加初始发射脉冲的能量,就一般会导致脉冲变长。反过来说,长脉冲也会导致对回波时间测量的精度和准确性变差。结果是这两大因素形成一对矛盾。

数字信号处理技术给雷达带来了三大变革。

首先,在收到脉冲之后,能够利用数字信号处理技术压缩脉冲。这样可以在不减少操作距离的情况下提供更好的距离分辨力。

其次,利用数字信号处理技术,可以对接收到的信号进行数字滤波,以减少其中的噪声。这样可以在不降低距离分辨力的情况下增大作用距离。

最后,利用数字信号处理技术,可以让雷达快速选择和产生不同的脉冲形状和长度。这就允许人们对于特定的探测目标,选用经过优化的脉冲。

不过值得指出的是,雷达脉冲波形频率很高,可以达到数百兆赫兹。因此雷达数字信号处理问题中,一般要求对应的数字信号处理硬件电路速度很快。

2. 声纳

声纳分为主动声纳和被动声纳两类。

在主动声纳中,发送的声脉冲的频率范围为 $2\text{kHz} \sim 40\text{kHz}$ 。其用处包括对海中物体进行探测和定位、导航、通信等。一般情况下其最大作用距离为 $10\text{km} \sim 100\text{km}$ 。

相对而言,被动声纳仅仅是收听水下的声音。因此,作战时隐蔽性比较好。

数字信号处理技术同样给声纳带来三大变革,即脉冲产生、脉冲压缩、对信号的滤波。

在某种意义上声纳比雷达简单,这是因为其脉冲所包含的频率比雷达低得多。但从另外一个意义上说,声纳比雷达又复杂得多,这是因为其所处环境比雷达复杂。

1.2 数字信号处理技术的概念及其发展

数字信号处理技术,一般是指将通用的或者专用的 DSP 用于完成数字信号处理的方法与技术。

从历史观点来看,微处理器诞生于 20 世纪 70 年代。其后,就分为三类,即通用 CPU、MCU、通用 DSP,这三类微处理器各有特点。