

沈绪榜 编著

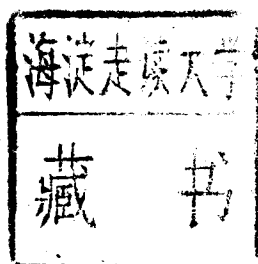
数字信号处理计算机

宇航出版社

TP33
SXB/1

数字信号处理计算机

沈绪榜 编著



学 航 出 版 社

1021669

内 容 简 介

本书的前三章重点介绍了数字信号处理的应用、信号的转换和产生、以及数字信号处理的算法和技术。在介绍的各种数字信号处理计算机中,第四章重点介绍Intel 2920、TMS 32010、 μ PD 7720等三种流行的单片机。第五至第八章介绍了以快速傅里叶变换算法为基础的位片、单片、高速与级联等四种计算机结构。第九、十章介绍了坐标旋转数字计算机。第十一章介绍了数论FNT计算机。第十二章介绍了对数运算技术。第十三至十五章介绍了细胞、脉动与联想等阵列计算机。第十六章介绍了统计方法在数字信号处理计算机设计中的应用。

本书可供从事VLSI电路设计、计算机及数字系统的高等院校有关专业的师生们参考;也可供从事数字信号处理计算机设计、应用的工程技术人员参考;还可作为研究算法与计算机体系结构关系的参考用书。

JS380/14

数字信号处理计算机

编著 沈绪榜

特约编辑: 居绍一

责任编辑: 廖寿琪

宇航出版社出版

北京和平里滨河路1号 邮政编码100013

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

密云华都印刷厂印刷

开本: 787 $\times$ 1092 1/16 印张: 17.375 字数: 434千字

1991年9月第1版第1次印刷 印数: 1—2500册

ISBN 7-80034-288-3/TP·021 定价: 11.00元

序 言

数字信号处理, 简称DSP (Digital Signal Processing), 它的应用已经成为一种明显的趋势。特别是自1965年Cooley-Tukey发明了快速傅里叶变换 (FFT) 算法以来, 专用的DSP计算机在70年代初期就在市场出售了。最近, 由于VLSI技术的迅速发展, 各种单片DSP处理机 (或计算机) 也大量出现, 以适应多方面的需要。由于DSP计算机, 像存储器那样, 已是VLSI技术的最重要应用领域之一, 很多VLSI芯片都是为DSP应用设计的。美国的VHSIC计划, 就是以开发DSP芯片为目标的。

从1981年开始, 我们在研制国产16位77型微计算机的基础上, 也着手了对DSP计算机组件的研制工作。到目前为止, 已经研制出了NMOS12位阵列乘法器、16位阵列乘法器、16位阵列乘法累加器、以及专用累加器等DSP组件, 并已提供用户使用。还有一些其它DSP组件, 正在设计研制之中。这些组件的体系结构的确定, 主要取决于两个方面。一个是实现条件, 即工艺水平等; 另一个是使用要求, 即将要覆盖的应用领域。

由于实现条件与应用要求, 都是在向前发展的, 因而芯片体系结构的选择, 必然是自底向上的, 即从小芯片的体系结构, 逐步发展到大芯片的体系结构, 并不断上升。这就要求按结构元的指导思想, 来选择芯片的体系结构。例如, 晶体管是第二代计算机的结构元。人们用它作成了不同字长、速度与指令集合的计算机; 将这些结构元在芯片上集成, 产生了中小规模集成电路。中小规模集成电路又是第三代计算机的结构元。因为用它们也能作成不同字长、速度与指令集合的计算机; 将这些结构元在芯片上进一步集成, 则产生了大规模集成电路。所以, LSI技术是晶体管与集成两个概念的产物。但是, 大规模集成电路, 由于集成度的提高, 封装引出头数目的限制, 使情况发生了变化, 很少具有结构元的特点。我们既不能用一般8位微处理器器件, 去构成16位或32位的微处理器; 也很难将一些大规模集成电路直接在芯片上进一步集成, 构成更高集成度的芯片。也就是说, 芯片的掩膜版图, 一般是不能用于许多场合的, 由于集成度越高, 这种开销越大, 是不利于LSI技术的迅速发展的。因此, 人们自然要设法使更高集成度的芯片, 也具有结构元的特点。

由于引线数量的限制, 为了解决这个问题, 必须从芯片的内部结构、外部接口 (也就是向上的体系结构), 以及品种系列 (也就是要覆盖的应用领域) 等三个方面, 综合地加以考虑。换句话说, 芯片的内部结构, 应当是可重用的, 即一种设计, 能够容易地派生出同类的芯片设计。例如, 对于微处理器芯片, 重用的意思, 就是要能利用一个设计, 产生出许多不同字长等指标的微处理器芯片; 芯片的外部接口, 应当是协处理的, 即用这些芯片, 能容易地构成所需要的系统, 或构成集成度更高的芯片; 芯片的品种系列, 应当是优选的, 即用尽可能少的芯片品种, 就能覆盖所需的应用领域。

由于中国现有的工艺条件, 还只能实现面向逻辑的LSI芯片设计, 但对芯片的结构选

择,使其具有结构元的特点,是适应今后VLSI技术发展方向。因此,我们在从事DSP组件的过程中,尽可能地收集了各种DSP计算机的有关资料,以便使这些组件的体系结构具有结构元的特点。

人们会问:为什么不能用一般的计算机,特别是微计算机,来实现高速数字信号处理的任务?因为从DSP的基本运算可以看出,有三个方面是一般计算机所不能适应的。一是DSP基本运算中,乘法、矢量旋转、以及三角函数等是很普通的,要求能很快的计算;二是一般计算机的体系结构,对高速信号处理应用中经常出现的数据结构,例如,循环缓冲等,只能提供繁琐的寻址算术;三是信号处理算法具有很好的并行性,在一般计算机系统中就不能有效地利用。因此,DSP计算机与一般通用计算机的主要差别,也就体现在这三个问题的处理上。DSP计算机一般具有适应数字信号处理算法基本运算的指令;也具有适应数字信号处理数据结构的寻址机构;三是充分利用算法中的并行性,以达到实时信号处理的要求。换句话说,DSP计算机是以算法特点为基础进行设计的;体系结构直接反映算法的特点,是按算法来设计机器的。由于VLSI技术的迅速发展,人们估计,到1990年,按算法定作的芯片将上升到30%至50%。由于芯片设计的开销巨大,过去是利用大量生产,从定作的设计走向标准化产品来解决的。现在,由于VLSI计算机辅助设计新工具的成熟,使定作的设计又有了新的发展。

这本书将专门介绍按各种算法设计的各种DSP计算机的体系结构。尽管DSP技术的应用领域是多方面的,但是,实际的信号操作,是以一组比较小的DSP的基本运算为基础的。这些基本运算有卷积、相关或差分方程计算,DFT系数计算,矢量或矩阵算术等,已有的实际问题,就是简单地指明这些运算的适当组合,以完成所要求的信号处理。

由于信号往往是以模拟量的形式出现的,为了应用DSP技术,需要将它们转换成数字信号。计算机的结果往往也需要还原成模拟量的形式。这将在第二章中介绍。

由于DSP计算机的体系结构,是与其算法和技术直接相关的。为便于了解DSP计算机的设计方法,在第三章中将作必要的DSP算法与技术介绍。

为了实用起见,材料的选择尽量以现有实际DSP计算机为基础。第四章介绍的单片DSP计算机,就是流行的三个单片DSP计算机Intel 2920, TMS 32010, 以及 μ PD 7720。

FFT计算机是数字信号处理的主要工具。它的应用已不再局限于某些数据的事后处理,而是已经扩展到实时处理以及控制系统中了。将分四章介绍,其中第五章介绍位片式FFT计算机,它是按时间抽取与置算法设计的,其蝶式运算部件的逻辑是每4位分成一块芯片,能通过这种位片的组合以适应8位12位以及16位等不同精度的需要。这种设计要求集成度低,适合于LSI实现。第六章介绍单片FFT处理机,它是以VLSI技术为基础设计的。它采用了基4的蝶式运算与位串行算术,达到了很高的运算速度,而且可以组成阵列处理机。第七章介绍高速FFT计算机,它是按频率抽取与固定几何算法设计的,而其蝶式运算部件的逻辑是按功能划分的,其中最重要的LSI电路就是快速阵列乘法器,对它将作详细的介绍。由于在雷达等系统的信号处理中,对速度的要求是很高的,为了满足这种要求,往往用许多FFT计算机进行级联,按流水线方式工作。这种体系结构将在第八章的级联FFT计算机中介绍。以上四种FFT计算机都是以实际机器为背景介绍的,而且矢量的旋转都是用复数乘法实现的。复数乘法方法提供了比实际需要更多的能力,可以改变数据的大小与相位。但FFT算法只要求相位的改变,而且的确也存在只适合于相位改变的技术,这些将在第十章旋转FFT计算机

中介绍。旋转FFT计算机是以CORDIC运算技术为基础的,故第九章专门介绍。CORDIC运算技术,可以使三角函数、双曲函数等的计算,比用一般的方法快得多,已用来设计专用计算机。

已经证明,在复数域上,基本函数是 $W_N = \exp[-j2\pi/N]$ 的DFT是具有循环卷积特性的最简单的变换。换句话说,不存在既具有循环卷积特性,基本函数又比 $W_N = \exp[-j2\pi/N]$ 简单的变换。但是,在整数域 Z_M 上是能构造出具有循环卷积特性,基本函数又比 $W_N = \exp[-j2\pi/N]$ 简单的变换。这就是数论变换NTT中要讨论的内容。按照数论变换的基本知识,可以设计出相应的数论FFT计算机;特别是Fermat数变换FNT使计算机的设计更方便,故在第十一章中介绍了一种国外已作过模型机的数论FNT计算机。

由于对数运算技术,能将乘法转换成加法处理,也已用于DSP中,故专用第十二章介绍对数运算技术。

对于要求非常迅速的数字信号处理,往往是采用阵列计算机完成的。特别是在图像信号的处理中,用阵列计算机已获得了很好的效果。阵列计算机的体系结构也很适合VLSI所要求的规则性,将分三章介绍。细胞阵列已应用很广,将在第十三章中介绍。在第十四章中介绍最近迅速发展起来的脉动阵列技术,它把VLSI技术与算法紧密结合在一起。在第十五章中,以STARAN机为背景,介绍联想阵列中的设计问题。由于VLSI技术的发展,性能与STARAN相当,但价格便宜一两个数量级的联想阵列,也在研制之中。

第十六章将简要介绍统计方法在DSP计算机设计中的应用。当然,非实时信号处理,也可以在一般计算机上,用专用程序来完成,这里将不作进一步讨论。总之,我们从FFT方法、CORDIC方法、数论方法、对数方法、阵列方法、以及统计方法等方面,介绍了算法与DSP计算机结构的关系,书后给出了英文缩写索引。希望这本书对中国DPS计算机的发展,对按算法设计LSI或VLSI芯片的方法,对培养芯片计算机设计人才,对中国集成电路事业的发展,能起到抛砖引玉的作用。由于我们从事这项工作时间短,水平有限,条件不完善,书中定有许多不妥之处,望读者及时批评指正。由于DSP计算机是下一代计算机中的关键机种,是计算机走向新阶段的重要基础,是中国四个现代化所必不可缺少的,我们还将要继续这一工作。因此,更希望得到同行们的帮助与支持。

最后,感谢各级领导同志对这一工作的支持与指导。感谢陕西微电子学研究所六室的同志们对研制DSP组件的大力支持与辛勤劳动。感谢万晓军同志帮助审查与整理了本书的全部资料。感谢宇航出版社为本书的编辑、审校、出版所做的细致繁琐的工作。

沈绪榜

1986年5月12日

目 录

第一章 DSP的应用与运算 (1)	
1.1 引言	(1)
1.2 DSP的应用领域	(1)
1.3 DSP的基本运算	(2)
1.4 DSP的实现方法	(4)
1.4.1 算法的开发	(5)
1.4.2 体系结构的开发	(5)
1.5 小结	(6)
第二章 信号的转换与产生 (8)	
2.1 引言	(8)
2.2 信号转换技术	(8)
2.2.1 量化噪音	(8)
2.2.2 数的表示	(10)
2.2.3 信号的重构	(11)
2.3 数据压缩技术	(12)
2.3.1 浮点PCM	(13)
2.3.2 自适应差分调制	(13)
2.3.3 μ 律和A律	(15)
2.3.4 对数转换技术	(18)
2.4 信号产生技术	(22)
2.4.1 正弦信号的产生	(23)
2.4.2 随机信号的产生	(25)
2.5 小结	(26)
第三章 DSP的算法与技术 (28)	
3.1 引言	(28)
3.2 变换分析	(28)
3.2.1 Z变换及其与拉普拉斯变换和 傅里叶变换的关系	(28)
3.2.2 离散傅里叶变换(DFT)	(30)
3.3 快速傅里叶变换(FFT)	(32)
3.3.1 按时间抽取算法	(32)
3.3.2 按频率抽取算法	(35)
3.3.3 离散傅里叶逆变换(IDFT)	(37)
3.3.4 实数的FFT算法	(38)
3.3.5 FFT的整序	(41)
3.4 FFT中有限字长的影响	(42)
3.4.1 溢出的影响	(42)
3.4.2 舍入的影响	(43)
3.5 小结	(43)
第四章 单片DSP计算机	(44)
4.1 Intel 2920单片机	(44)
4.1.1 体系结构	(44)
4.1.2 指令集合	(48)
4.1.3 应用设计	(50)
4.2 TMS 32010单片机	(54)
4.2.1 主要特点	(54)
4.2.2 体系结构	(54)
4.2.3 指令系统	(58)
4.3 μ PD 7720单片机	(62)
4.3.1 基本特点	(62)
4.3.2 输入输出	(64)
4.3.3 指令集合	(65)
4.4 小结	(70)
第五章 位片FFT计算机	(71)
5.1 引言	(71)
5.2 实现算法	(72)
5.2.1 蝶式运算的算法	(72)
5.2.2 位序倒换的算法	(73)
5.2.3 实数处理算法	(74)
5.3 蝶算位片组件	(75)
5.4 蝶算控制组件	(79)
5.4.1 复数蝶式运算的过程	(79)
5.4.2 实数处理算法的第一点计算	(81)
5.4.3 实数处理算法的其它各点 计算	(83)
5.5 地址控制器	(86)
5.5.1 位序倒换的地址算法与实现	(86)
5.5.2 实数处理运算的地址算法	

与实现	(86)	9.5 双曲函数的实现	(143)
5.5.3 蝶式运算的地址算法与实现	(87)	9.6 CORDIC技术的几何解释	(144)
5.6 小结	(90)	9.7 微处理机结构	(147)
第六章 单片FFT处理机	(91)	9.8 坐标转换中的应用	(150)
6.1 引言	(91)	9.9 交流模数转换中的应用	(152)
6.2 CUSP的结构	(92)	9.10 小结	(154)
6.2.1 CUSP芯片的内部结构	(92)	第十章 旋转FFT计算机	(155)
6.2.2 信号处理能力	(93)	10.1 引言	(155)
6.2.3 CUSP的体系结构	(94)	10.2 CORDIC旋转的方法	(155)
6.3 位串行算术	(96)	10.3 CORDIC旋转的实现	(157)
6.3.1 数的表示问题	(96)	10.4 固定角度旋转的方法	(159)
6.3.2 计算精度问题	(97)	10.5 固定角度旋转的实现	(164)
6.4 小结	(98)	10.6 小结	(170)
第七章 高速FFT计算机	(99)	第十一章 数论FNT计算机	(171)
7.1 引言	(99)	11.1 引言	(171)
7.2 高速蝶式运算部件	(100)	11.2 余数系统的算术	(171)
7.3 地址与控制部件	(104)	11.2.1 中国余数定理	(171)
7.4 阵列乘法器	(107)	11.2.2 RNS算术	(173)
7.5 奇值逻辑的复数乘法器	(114)	11.2.3 数制系统的转换	(176)
7.6 Data General AP/130数组 处理机	(119)	11.3 FNT计算机的设计	(177)
7.7 小结	(122)	11.3.1 亏1码的运算	(179)
第八章 级联FFT计算机	(123)	11.3.2 32点FNT的流水线结构	(180)
8.1 引言	(123)	11.3.3 FNT加法器的设计	(180)
8.2 流水线计算	(123)	11.3.4 利用FNT的数字滤波器体系 结构	(182)
8.3 匹配滤波器的实现	(125)	11.4 RNS数字处理机的VLSI 实现	(183)
8.4 匹配滤波器设计举例	(128)	11.4.1 RNS算术的实现	(184)
8.4.1 数据格式	(128)	11.4.2 其它关键计算	(185)
8.4.2 CE的结构	(130)	11.5 小结	(186)
8.4.3 基的权衡	(130)	第十二章 对数运算技术	(187)
8.4.4 存储器要求	(132)	12.1 引言	(187)
8.5 快速卷积器的计算速度	(133)	12.2 对数的表示	(187)
8.5.1 双流水线FFT系统	(133)	12.3 运算的方法	(189)
8.5.2 单正FFT系统	(134)	12.4 方法的实现	(192)
8.5.3 单逆FFT系统	(134)	12.5 代码的转换	(195)
8.5.4 可重构FFT系统	(135)	12.6 小结	(196)
8.6 小结	(137)	第十三章 细胞阵列	(197)
第九章 CORDIC运算技术	(138)	13.1 引言	(197)
9.1 引言	(138)	13.2 细胞逻辑图像处理机CLIP	(198)
9.2 乘除法的实现	(138)	13.2.1 阵列的符号表示	(198)
9.3 总的CORDIC方程	(139)	13.2.2 CLIP IV的体系结构	(199)
9.4 圆函数的实现	(140)		

13.2.3 位面操作.....	(199)	14.5.2 用邻主元的三角形化.....	(230)
13.2.4 指令集合.....	(200)	14.5.3 正交三角形化.....	(231)
13.3 分布阵列处理机DAP.....	(202)	14.5.4 线性最小二乘法计算.....	(231)
13.3.1 机器的组织.....	(202)	14.6 可程序设计的处理元结构.....	(233)
13.3.2 操作的实现.....	(204)	14.7 小结.....	(235)
13.3.3 软件.....	(206)	第十五章 联想阵列.....	(236)
13.3.4 在DAP模型机上用的算法.....	(207)	15.1 引言.....	(236)
13.3.5 应用.....	(210)	15.2 位串行的联想计算机.....	(237)
13.4 巨型并行处理机MPP.....	(211)	15.3 联想存储器的设计.....	(239)
13.4.1 机器的组织.....	(211)	15.4 多匹配分解器的设计.....	(243)
13.4.2 阵列的体系结构.....	(213)	15.5 联想处理及其指令集合.....	(244)
13.4.3 位面操作.....	(215)	15.6 小结.....	(247)
13.5 互连网技术.....	(216)	第十六章 相关计算的统计方法.....	(250)
13.6 小结.....	(218)	16.1 引言.....	(250)
第十四章 脉动阵列.....	(219)	16.2 概率函数.....	(250)
14.1 引言.....	(219)	16.3 随机仿真序列的产生.....	(251)
14.2 一维阵列.....	(220)	16.4 相关计算.....	(252)
14.3 二维 R 型阵列.....	(223)	16.5 小结.....	(253)
14.4 二维 H 型阵列.....	(226)	英文缩写索引.....	(255)
14.5 二维 T 型阵列.....	(229)	参考文献.....	(265)
14.5.1 基本思想.....	(229)		

第一章 DSP的应用与运算

1.1 引言

数字信号处理中所用的一些公共的算法和技术,对DSP计算机的体系结构是很重要的,因为它们实际上就是实现这些算法和技术的。Von Neumann的突出贡献是提出了程序计数器的概念,它对计算机的指令序列和数据流提供集中的控制。然而,这个机理变成了输入/输出数据流的瓶颈,从而形成了一些改良技术,例如,中断DMA,输入输出通道等。由程序计数器强迫的严格顺序性,妨碍形成执行的并行性。未来的高性能系统必须有处理这种问题的能力,并在计算机的设计方法学中解决这些问题。因此,在这一章中,首先考查DSP技术的应用领域,以便从中抽出处理要求的特征与结构;其次将说明,所有信号处理的算法结构,可以由一组基本运算表示。这就为从处理到计算机的设计提供了有力的手段。第三,将建立从问题到确定计算机的过程的初步描述。

1.2 DSP的应用领域

数字信号处理的概念和技术,已经而且将继续用到许多方面,这里仅列出已经成功地采用数字信号处理技术的一些主要应用领域,以指明存在的应用范围及每个领域中涉及问题的一般性质。

语言处理 它是最早研究采用数字信号处理技术的领域之一。在这个领域中存在两个主要问题。第一个问题是人的语言信号的分析。应用于自动语言识别系统,声音的识别或验证以及语言波形的参数化。语言信号有效传输与存储的编码和压缩等方面。第二个问题是语言的综合。在这个领域已取得了很大的进展。数字语言综合系统已有许多应用,例如,盲人用的自动阅读机,语言残废人用的语言综合器,声音响应的计算机终端,以及说话玩具与家用电器等。从压缩和编码的语言信号,重构能懂的语言的许多语言综合系统,现在是可用的,许多仅由两三块集成电路组成。

音乐处理 在音乐处理领域中,有几个信号处理问题已使用数字技术。这些问题包括,把多个音乐信号编辑与混合成单个节目,以及通过加上特殊的效果,例如,回声与同声效果,以增强音乐信号。数字技术也已用于音乐的作曲,综合,记录以及传输,以及旧录音的复原中。

地球物理学 它是使用数字技术历史较久的领域。主要处理问题涉及地震信号的分析,以便于制作地球内部结构和性质的模型,研究地震与火山的活动,以及用于探测石油等。数字处理技术最近也用于分析从大气层上反射回来的无线电波,以确定大气层的性质,如电子

含量。

雷达 雷达系统是应用高性能数字信号处理技术的一个例子。现代雷达系统的主要信号处理功能包括信号产生, 匹配滤波, 门限比较, 以及目标参数, 如射程, 方位与速度的估算。由于与雷达信号很宽的带宽 (10到100MHz) 相联系的很高数据速率, 雷达中主要关心的是减少数据量与速率, 以适合雷达系统中数据处理部分的处理。应用现代的高速数字元件设计与实现现代雷达系统的问题, 形成当前研究与开发高性能数字信号处理的一个非常活跃的领域。

声纳 声纳信号处理可方便地分成两类: 主动声纳信号与被动声纳信号处理。主动声纳系统有许多同雷达系统相同的信号处理概念。它们的信号脉冲都是产生和发射的, 信号的处理往往和检测与分析反射回波有关, 用于目标检测与定位, 导航与测绘。像雷达那样, 匹配滤波, 门限与目标参数产生等功能是主要的信号处理任务。被动声纳系统不同于主动声纳系统, 它们不产生与发射音响信号, 而只收听音响环境。主要的信号处理任务是高分辨率的频谱分析, 以及传感器阵列处理, 例如, 定向收听的方向形成技术等。

图像处理 应用数字信号处理技术处理图像, 已受到当前集成电路技术进展的强有力的影响。由于单个数字图像信号, 以 1 兆个采样值的量级表示, 要求高性能的处理机与高密度的数据存储器是显然的。数字处理技术得到成功应用的图像处理问题主要有: 数据压缩, 图像复原, 清晰化与增强, 以及从X射线投影, 雷达, 声纳, 超声与红外信号建立可视图像。

通讯 整个通讯领域, 简直没有不受数字信号处理技术影响的地方。数字技术已用于信号调制, 多路传输, 编码与数据率压缩等问题中。在电信领域, 数字处理技术已发展到音调检测, 回波清除以及数字开关网。许多声频通信信号处理功能, 已由单块集成电路实现。

生物医学信号处理 数字信号处理技术的使用正在医学应用中扩散, 例如, EEG与ECG信号的分析, 以及计算机辅助的多截面图处理。

除了上述应用领域外, 最近的应用还有电力分布安排, 环境的空气污染研究, 以及目标检测系统。还有, 上面没有提到的军事应用, 例如, 导航系统, 制导与控制, 电子对抗, 磁力异常检测等。总之, 数字技术已迅速扩展到每个有信号处理的应用领域。

1.3 DSP的基本运算

影响信号处理要求的明显因素是信号的特征。通常, 信号特征有两个与应用相关的方面。第一个方面是基本的信号参数, 例如, 频率内容、动态范围与信噪比, 这些考虑将影响采样速率与采样量化要求。就这些信号特征来说, 许多单个的应用领域具有类似的要求。例如, 前述应用中的许多信号属于声频信号。信号特征的第二个方面是如何给出信号的信息内容的模型。这种信号模型确定如何解释信号以得到信息。模型通常涉及到信号源以及传输介质的影响。在确定实际信号处理要求中, 信号模型是头等重要的。例如, 语言处理与电信领域, 都涉及低的声频信号, 能用类似的采样速率与采样量化来适当地处理。然而, 它们的信号模型差别很大。对于电信, 信号模型主要涉及到各种调制, 多路选择以及信号编码方案, 以实现有效的传输。此外, 这些信号模型是根据传输通道的特征给出的。对于语言处理, 信号模型是基于人的语言产生的机理。语言波形模型通常作为一个慢变化线性系统对一个周期

的或噪音式激励信号的响应而给出的。由于信号模型的信息内容与格式中的这些差别，这两个领域的总的处理要求是很不同的。

根据各种应用的信号模型与具体问题或目标，必须形成处理运算上所要求的结构。实际的信号操作是以一个比较小的基本信号处理运算的集合，例如，滤波运算的卷积，相关或差分方程计算，DFT系数计算，向量或矩阵算术运算等为基础的。已有的实际问题，就是简单地指明这些运算的适当组合，以完成所要求的处理与极小的性能要求。

处理要求规范化的这个观点，提供了处理所需要的一个公共的处理函数类型的集合，这是很重要的。这些通用处理函数类型，称作DSP的基本运算，将简述如下。

(1) 差分方程计算：

$$y(n) = \sum_{k=0}^N a_k x(n-k) - \sum_{k=1}^M b_k y(n-k) \quad (1)$$

这个方程表示一个递归的或IIR滤波运算的一般计算要求；其中 $x(n)$ 是输入序列，而 $y(n)$ 是滤波输出序列。参数 N, M, a_k 与 b_k 定义实际的传递函数，或者等效地定义滤波器的相位或幅值响应。

如果系数 b_k 都是零，那么方程(1)化为一个非递归的或FIR数字滤波运算的有限卷积和。

$$y(n) = \sum_{k=0}^N a_k x(n-k) \quad (2)$$

在这种情形，方程(2)的系数 a_k 可解释成滤波器的脉冲响应。

(2) 相关系数计算

相关运算是另一种经常使用的运算：

$$\phi(n) = \sum_{k=-N}^N y^*(k) x(n+k) \quad (3)$$

其中区间 $-N$ 到 N 表示两个信号相关的窗口，且 y^* 表示 $y(k)$ 的复数共轭。

(3) 复频率变换

一个数字信号到一个不同频带的变换，可以表示成一个复数乘法

$$y(n) = \exp(j2\pi nk) x(n) \quad (4)$$

其中参数 k 表示变换频率对输入序列 $x(n)$ 的采样频率的比。

(4) 离散傅里叶变换计算

DSP的最广泛要求的计算之一是离散傅里叶变换系数的计算，用下列方程表示：

$$x_k = \sum_{n=0}^{N-1} x(n) \exp[-j(2\pi/N)nk], \quad k=0,1,\dots,N-1 \quad (5)$$

其逆关系为

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x_k \exp[j(2\pi/N)nk], \quad n=0,1,\dots,N-1 \quad (6)$$

以后将会讲到，这些计算总是以基于蝶式计算

$$X_k = A + j(-BW_N^k) \quad (7)$$

的FFT算法形式完成, 其中 A 与 B 一般是复数, 且

$$W_N^k = \exp[-j(2\pi/N)k]$$

(5) 功率谱密度或幅值平方计算

一个复数序列的平方幅值计算表示DSP的另一个基本计算要求。

$$|X_k|^2 = X_k X_k^* \quad (8)$$

(6) 矩阵算术和矩阵处理

许多信号处理问题以向量或矩阵的格式描述, 从而要求完成矩阵算术与矩阵处理的基本运算。算术要求有可变维度矩阵的加法、减法与乘法。要求的主要处理功能有矩阵求逆, 转置与复数共轭。

(7) 对数与取幂

为了完成同态信号处理的运算, 要求有完成对数与指数变换的能力。

(8) ADC与DAC

最后, 模拟到数字与数字到模拟转换的功能, 是DSP的基本要求。以上这些, 将从信号处理的要求导出, 形成了DSP计算机体系结构的基础。为了确定一个处理系统的体系结构, 必须考虑应用领域的算法要求, 以及实现细节。特定的应用领域将不仅指定要求怎样的处理运算序列, 而且将指定就吞吐量而言的性能要求。性能要求将由采样速率与字长, 实时与多通道处理的需要, 以及所要求的基本运算的确切参数化等因素决定。

除了功能上的性能要求规范外, 个别的应用将确定非功能上的要求与限制, 例如, “硬件的物理特征” (体积、质量与功耗等), 软件与程序设计目标, 价格限制, 可靠性, 以及可维修性, 增长的潜力与可扩展性等。

从上述DSP的基本运算可以看出, 为什么通用的单处理机计算机, 特别是微计算机, 在高速信号处理领域中只取得有限的成功。基本理由有三点: 一是它们通常不能有效地完成许多基本运算, 例如乘法, 矢量旋转, 以及三角函数等; 而这些运算在矩阵算术与信号处理算法中是很普通的; 二是通用计算机体系结构对数据结构, 例如循环缓冲等在高速信号处理应用 (例如通讯) 中就经常发生, 只能提供繁琐的寻址算术; 三是信号处理算法具有很好的并行性, 但在一个单处理机系统中不能有效地利用。所以, DSP计算机与一般通用计算机的主要差别, 一是它们一般具有适应数字信号处理算法基本运算的指令; 二是它们有适应信号处理数据结构的寻址机构; 三是充分利用算法中的并行性。

1.4 DSP的实现方法

在一个特定的应用领域中, 各种信号处理技术与功能的实际实现, 可以从使用专门的固定功能的硬件到使用在通用计算机上的软件。

实现方法的选择由价格性能考虑与处理灵活性要求等来决定。对于某些应用领域, 在硬件实现上有下列倾向。

语言: 单片信号处理机到大型计算机

音乐: 小型机与专用处理机

雷达：专用处理机

声纳：专用处理机/阵列处理机

震动：通用大型机/阵列处理机

图像：通用大型机/阵列处理机

生物医学：专用硬件/微小型机

电信：专用系统/通用处理机专用功能IC。

集成电路技术的进展，使许多信号处理功能采用单片专用处理机实现，特别是在声频带通讯领域中。最近，用于实时声音信号处理的单片通用信号处理机的开发，已开始取代固定功能的途径。随着集成电路技术的继续进展，在DSP的实现中保持通用的趋势将是一个主要的因素。

DSP计算机的设计工作可以分成两个方面：理论问题模型的建立与处理模型的计算机实现。更细的划分如图1.1所示，可以分作五级。但可看出，与DSP理论和实现相关的两个主要活动是：算法开发与硬件体系结构开发。

1.4.1 算法的开发

任何具体应用的DSP技术的实现，传统上包含有效算法的开发，或有效系统体系结构的开发，或两者都有。无论那种情形，应用的硬件费用的限制与实时性能要求都是主要考虑因素。此外，算法和体系结构必须关连起来，以产生可接受的系统。

从图1.1看出，有效算法开发的活动，是从第三级基本运算到第四级的一个向下映射。术语“有效”通常意味着减少乘法数目，因为它要求较多硬件或时间开销。最有名的例子就是FFT算法。然而，减少乘法数目通常都要带来更复杂的数据处理要求，用硬件实现时就要有更复杂的控制逻辑，用软件实现通常要增加算法的复杂性。

集成电路技术的进展，使乘法运算同加法运算一样的快，因此，对这种新元件来说，用乘法数目衡量算法的时间复杂性就不够了。随着IC技术的继续进展，从算法开发努力中得到的好处，可能在元件设计一级比在系统实现一级更多。

1.4.2 体系结构的开发

从图1.1中看出，体系结构的开发是从可用的元件技术第五级到第四级基本系统运算的一个向上映射。

DSP技术的计算要求，特别是在实时应用中，通常是太苛刻了，除了最大最贵的通用计算系统外，其它通用机是难以满足要求的。因此，DSP技术的许多应用，仅能通过专用处理机的设计来实现。在过去，上节所给出的基本运算，用硬件实现是比较复杂的运算。所以，单个功能，例如数字滤波，相关或DFT系数计算，用一个专用处理机实现是不奇怪的。一般说来，可以设计一个专用处理系统，使用大量的专用硬件，以满足任何给定的性能要求。然而，从硬件和设计复杂性来说，在过去，这种系统的价格都是行不通的，这种系统缺乏灵活性，对于每一个新的应用以及新的元件技术，都要有新的设计。

降低设计费用与改善灵活性的努力，导致开发可程序设计的专用处理机。通常，这些处理机限于完成一种类型的功能，例如，数字滤波，或FFT计算，但提供可程序设计的参数控制。这种处理机可用作许多具有不同要求系统中的模块，能够降低整个系统的设计费用，并给系统带来一些灵活性。

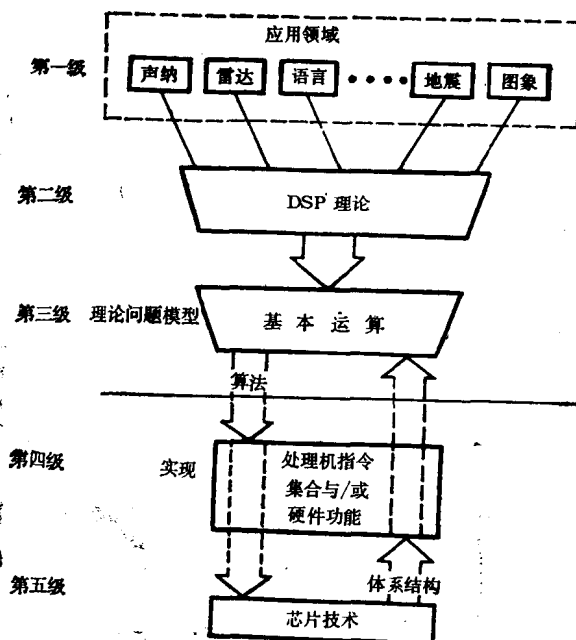


图1.1 DSP问题的结构层次

对于实时性要求不高的应用，可用通用机编程序完成DSP功能。一般通用机很少提供适合DSP功能的指令。开始适合DSP要求的通用机早在70年代就开始出现了，采用多处理机设计方案。随着VLSI技术的发展，采用多处理机系统，提供许多DSP应用所要求的实时性能，对设计通用信号处理硬件来说，很快变为一种合算的途径。在未来的DSP实现中，有效的多处理机体系结构的开发，将无疑变得更为主要。要解决的关键问题是整个系统处理要求的划分，对处理机的任务分配，以及多处理机的同步与控制。

1.5 小结

前面的叙述强调了三。首先，在许多主要应用领域中，信号的基本参数有很大的相似之处，但是，从一个领域到另一个领域，信号的信息内容的模型差别很大。正是这种信息内容模型，通常是确定一个应用的详细处理要求的。其次，指出了由信号模型决定的特定处理要求，往往是一些比较少量的基本运算的组合，利用这些基本运算，所有应用的处理要求都可通过指定适当的组合与参数来描述。第三，强调了所打算的应用将不仅决定信号的特征，以及要求怎样的处理，而且也决定处理的吞吐量与其它性能要求。

这三点中最主要的是第二点。正是这组能以各种互连结构组合的基本运算，刻划了处理

算法，并最后导出计算机的设计。这些基本运算全都包含有乘法和加法，对于实时信号处理在通用机上用程序实现，通常是不能满足性能要求的。所以，这些基本运算的计算结构必须由信号处理计算机的体系结构来支持。这些基本运算成了比较信号处理机体系结构与性能的重要计算结构。应用领域的差别在于它们使用的基本运算，以及对执行基本运算的时间限制。

每一种表示在处理机的体系结构上有很大差别。在状态空间方法中，矢量运算的内在并行性导致一个等效的数据路径并行性的设计。然而，矢量处理的一个内在要求是矩阵求逆，对这个运算没有出现快速算法，从而也没有出现反映一个系统状态空间表示的处理机体系结构。另一方面，用带有数据路径的高速乘法器和加法器，来实现由差分方程所表示的算法的处理机已是足够的。此外，FFT为进出频率域提供一个方便的手段，所以，可以利用这个合适的途径。许多反映信号处理的这种途径的处理机体系结构，将在以后的许多章中讲到。

第二章 信号的转换与产生

2.1 引言

数字信号处理意味着模拟信号必须以某种数字形式来表示,即要完成从模拟到数字的转换。将模拟信号转换成数字信号一般有两个基本不同的操作。一个是采样,完成从连续时间量到离散时间量的转变;另一个是采样量化,完成从连续的大小到离散的大小表示的转变。

信号的转换,也由于要提高信号的传输效率,需要进行数据的压缩,导致了各种转换技术的开发。通常,处理或传输后的数字结果,需要变换成模拟的形式。从数字到模拟的转换也需要两步完成,一步是将数字量转换成模拟量,第二步是将离散时间的量变成连续时间的量。有时,还需要从机器内部产生信号处理所需要的模拟信号,通常叫做信号的产生。

2.2 信号转换技术

在线性信号转换技术中,模拟量与数字量的大小成线性关系。共有三种采样量化方法,即舍入法,截断法与按符号截断法,如图2.1所示。在舍入法中,采用最靠近实际采样值的量化级去近似采样值,如图2.1(a)所示。在截断法中,采样值由不大于实际采样值的最高量化级来近似。这种量化法等于舍掉小于半个量化级的采样值,如图2.1(b)所示。按符号截断法,是截断法的一种变形,它等效于对正采样值是截断,对负采样值,则用不小于实际采样值的最靠近量化级来近似,如图2.1(c)中所示。

数字信号 $x(nT)$ 可以看作是由两部分组成的:

$$x(nT) = x_0(nT) + e(nT)$$

其中 $x_0(nT)$ 可以看作在 $t = nT$ 时的实际信号值,而 $e(nT)$ 是加上的误差信号,叫做“量化噪声”。

2.2.1 量化噪声

量化噪声是实际输入采样值和定点二进制表示之间的差值。通常模数转换器的输出为一个 $(W+1)$ 位的定点数,包括符号位。故对应的分辨度为 $1/2^W$ 。在这种情况下,相邻量化级之间的差是 $Q = 1/2^W$,而且对舍入法来说,最大可能的量化误差是 $Q/2$ 。通常假定,舍入量化误差的概率密度函数是均匀的,如图2.2所示。

实际的量化情况如图2.3所示,假定模拟信号在时间区间 t_s 到 t_e 之间是线性的,那么对应的量化误差与平方量化误差将分别如图2.4中所示。