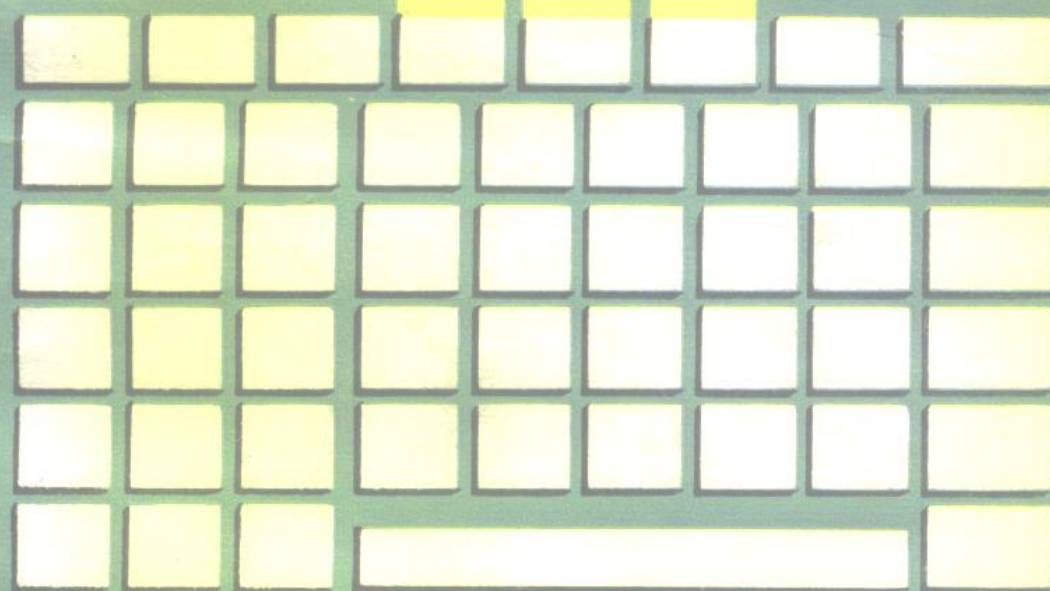


微处理器与微计算机在通信中的应用丛书

4

信号处理器

谢承铨 编著



国防工业出版社

73-012
916

微处理器与微计算机在通信中的应用丛书 4

信号处理器

谢承锟 编著



国防工业出版社

0010155

内 容 简 介

本书比较系统地叙述了信号处理的实现途径与方法,讨论了信号的样品处理和实时处理的基本步骤及其中的一些主要技术问题。在后面几章中,对使用随机逻辑、程控方法、微处理器、高速位片等,进行了较详细的论述。第六章集中讨论了当前众所关注的单片信号处理片的原理及其应用开发方法。第七章讨论了多处理器信号处理器。最后一章叙述了超大规模集成电路阵列处理器,以适应日益增长的高速信号处理的要求。

本书可作为大学高年级学生、研究生学习信号处理的一本参考书,也可供有关专业的工程技术人员阅读和参考。

微处理器与微计算机在通信中的应用丛书

信号处理器

谢承锐 编著

国防工业出版社出版、发行

(北京市海淀区紫竹院南路23号)

新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印刷

*

787×1092 $\frac{1}{16}$ 印张7 $\frac{1}{4}$ 162千字

1990年3月第一版 1990年3月第一次印刷 印数: 0,001—2,166册

ISBN 7-118-00399-9/TN86 定价: 3.85元

前 言

信号处理作为一种理论与技术，经过数十年的历程，至今已成为非常重要的学科，在科学与生产实践中发挥了显著效益，成为很多领域瞩目所在。不少科研工作者在信号处理的理论与算法方面，做出了卓有成效的成果，已体现在大量有关文献中。比较系统的信号处理专著也陆续出版，汇集了各个时期的劳动结晶，成为科研、教育、生产应用等方面的有力工具。但是，这些著作大多把重点放在信号处理的理论与算法方面，这固然是十分需要的。作者认为，随着计算机与微电子学的发展，要使信号处理的理论与技术各个阶段不失时机地发挥效益，必需对信号处理的实现（Implementation）给以足够的关注。首先是因为，只有正确地解决实现的途径与方法，才能使信号处理在实际中有效地得到应用。而更重要的是，在当前，如何实现是一个相当复杂的问题，它要求我们使用信号处理的理论与方法和计算机、微处理器，以及 LSI、VLSI 的技术知识探讨最佳的信号处理系统的构成与有效的应用开发方法。这里，它所涉及的领域也是相当广泛的。不光是因为它跨越了多种不同的专业（譬如通信、雷达、语声、地震、水声、机械、生理等），而且实现手段本身也是多种多样的，从局部性课题到非常庞大的处理系统。从信号处理如何实现这一统一观点来归纳、分析，形成比较系统的知识，将会促进信号处理的理论与实际的结合，使之在科研与生产的实践中产生更大的效益，反过来也将推动信号处理的理论与方法的进一步发展。作者持有这种倾向性的见解编写了此书，朝着这个方向迈出了很小的一步。由于作者的水平所限，书中定有不少错误，请广大读者给予批评指正。

在本书编写过程中，得到蓝海同志的协助，在此深表谢意。

目 录

第一章 信号处理的任务	1
§ 1-1 信号处理的基本概念	1
§ 1-2 信号处理的基本内容	1
§ 1-3 信号处理的算法特点	9
§ 1-4 信号处理技术的应用	10
第二章 信号处理的实现方法	13
§ 2-1 概论	13
§ 2-2 样品处理——计算机系统处理	15
§ 2-3 实时处理	20
第三章 信号处理器的设计	21
§ 3-1 概论	21
§ 3-2 随机逻辑构成的信号处理器	21
§ 3-3 程序控制方式的信号处理器	26
第四章 微处理器信号处理器	29
§ 4-1 概论	29
§ 4-2 微处理器信号处理器的设计	31
§ 4-3 应用实例	33
第五章 位片式信号处理器	36
§ 5-1 位片概述	36
§ 5-2 Am2900系列简介	36
§ 5-3 几种常用位片	38
§ 5-4 系统设计	48
§ 5-5 系统开发	52
§ 5-6 应用实例	56
第六章 单片信号处理器	58
§ 6-1 概述	58
§ 6-2 μ PD7720	59
一、一般介绍	59
二、内部结构	60
三、指令	62
四、系统构成	64
五、系统开发	65
六、应用实例——声码器	66
§ 6-3 TMS32010	69
一、TMS32010信号处理器介绍	69
二、TMS32010的应用	73
三、TMS32010的应用开发	75

第七章 多处理器信号处理系统	80
§ 7-1 概述	80
§ 7-2 多处理器与分散处理	80
§ 7-3 多处理器系统的分类	81
§ 7-4 多处理器系统的设计考虑	83
§ 7-5 数论在信号处理多处理器系统中的应用——余数系统	85
§ 7-6 由信号处理器单片构成的多处理器系统	86
第八章 超大规模集成电路阵列处理器	95
§ 8-1 引言	95
§ 8-2 超大规模集成电路的设计	95
§ 8-3 信号处理阵列处理器	97
§ 8-4 收缩型 (Systolic) 阵列处理器	98
§ 8-5 波前型 (Wavefront) 阵列处理器	101
§ 8-6 TRANSPUTER	105
参考文献	109

第一章 信号处理的任务

§ 1-1 信号处理的基本概念

信号处理是指对现实世界 (Real World) 信号的提取、分析、变换和综合等处理过程的统称。

现实世界信号包括多种多样的自然与物理信号, 譬如语声信号、图象信号、地震信号、生理信号等; 也包括产生于人工制造又经过自然界各种因素不同程度的作用与影响的各类信号, 譬如雷达信号、通信信号、医用超声、机械探伤信号等。对于这些信号, 研究统一的处理方法, 就成为信号处理的基本任务。

信号处理与消息处理、数据处理的概念不同。消息处理是指对含有某种信息的信息进行外形上的或格式上的处理 (如格式变换等), 以利于消息的传递与交换。数据处理则是对数据本身进行必要的加工处理以供使用。与上面两种处理相比较, 信号处理似乎是最面向自然界的一种处理过程。

为了更具体的了解信号处理, 我们举出如下的一些例子:

语声信号的有声音, 是由声带振动激励声道而形成的, 如图 1-1 所示。

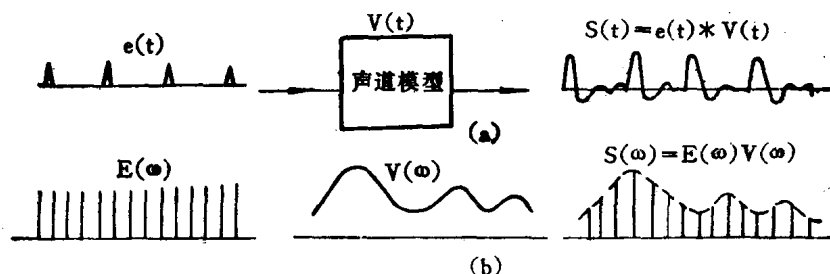


图1-1 有声音状态下的声道模型
(a) 有声音产生的时域模型; (b) 有声音产生的频域模型。

在语声信号中, 我们可以从时域波形直接看出它的一些特性 (譬如, 以基音为周期的谐音结构等), 但却不能全面地观察到它的频域特性。使用短时傅里叶变换的处理技术, 则可以从它的频谱包络外形清晰地看到它的声道频响特性及其变化过程。使用多个 (譬如 10 个) 滤波器来滤取各频谱分量的包络值, 也可以得到各频谱分量的缓变时间函数, 其结果对研究声道的声学特性及语言的分析与综合是非常有用的。

以生理信号为例, 脑电波的频谱分析, 能产生一系列随时间而变化的参数, 这些参数的变化, 表征着大脑活动的一些生理过程, 这对研究大脑的生理现象是非常有用的。这样的例子是不胜枚举的。

§ 1-2 信号处理的基本内容

一、模拟信号处理与数字信号处理

对于同样的现实世界信号, 根据手段的不同, 信号处理可分为模拟信号处理和数字信号处理两类。

模拟信号处理,是将信号作为一个随时间连续变化的函数来处理,使用的数学工具是微分方程或状态方程。数字信号处理,则是将信号作为在时间上是离散的幅度上经过数字量化的一串样值来处理,使用的数学工具是离散数学、差分方程或离散状态方程等。

早期的信号处理采用的是模拟方法,处理是由各种模拟电路来实现的。譬如线性放大、对数或反对数放大、调制解调、滤波及均衡等,这些曾在通信及模拟电子计算机等领域中得到广泛应用。这种处理方法虽曾发挥过很大作用,但在精确度、稳定性、灵活性和可实现范围等方面受到很大的限制。

近二十年来,由于集成电路,特别是数字集成电路发展很快,因此数字电子计算机及LSI、VLSI微处理器得到高速发展及广泛应用,使得数字信号处理与之相结合并在各个领域发挥了很大作用。数字信号处理的理论与方法的研究也获得重大进展,进入了发展与应用的全盛时期,这里我们作一概略的叙说。

首先是信号的离散化数字量化技术,使信号能以足够高的精度进入数字电子计算机进行处理。数字电子计算机以其日益增强的软、硬件处理能力为信号处理开拓了新的前景,并使各种复杂的信号处理运算成为可能。它使运算量很大的各种系统模拟课题能在有限时间内完成。所有这些对数字信号处理的研究工作和实际应用都是非常重要的。

数字化运算与处理技术,并不仅限于数字电子计算机的应用。由于LSI、VLSI技术的进展,微处理器、高速位片和单片信号处理器的出现,各种通用的或专用的信号处理机的研制成功,使得不少有实用价值的信号处理算法能够以实时(Real time)的速度完成,使信号处理技术向实用方向迈出了一大步。近年来,以VLSI为基础的阵列信号处理器的研究工作取得了重要进展,它很强的处理能力将为信号处理的应用与发展起到重要作用。

数字滤波器的发展成熟与走向应用,是数字信号处理的重大成就之一。一般模拟算法是比较容易找到与之对应的数字算法的。譬如,模拟放大对应数字的常数乘法或移位,模拟调制对应数字变量的相乘,模拟延时对应数字样点的地址迁移等等。但是,与模拟滤波器相对应的数字滤波器,却并不能采用如此简单的对应概念。数字滤波器是以信号的离散化及数字量化为前提的,它是在 z 变换的基础上产生出与模拟滤波器相对应的各种数字滤波器特性类型(如最平幅度特性、切比雪夫特性、椭圆滤波特性)的。之后,发展了在各种意义下最佳逼近给定转移函数的数值计算方法,由此可以获得一些在使用模拟滤波器时难以达到的特性。近年来,随着图象等多维信号处理的发展,多维数字滤波器的研究工作也有了很大的进展。总之,数字滤波器的发展与应用为数字信号处理奠定了一个重要的基础。

在模拟信号处理中,频谱分析一直是非常重要的课题。过去,它只能靠窄带分析滤波器的多次扫描来完成样品的频谱分析工作,要实现三维(时间、频率、强度)的实时分析处理是很困难的,精度和稳定性很受限止。数字化技术发展以来,在离散傅里叶变换的基础上,产生了FFT(快速傅里叶变换)算法。它使我们能在目前器件条件下,对一定宽度的频带(譬如话带或声频频带)内的信号进行三维实时分析处理,其精度与稳定性也有很大提高,能满足一定范围的实用要求。

信号处理发展到今天,频谱仍是主要研究对象之一,FFT对某些特定的信号(譬如

持续时间很短的信号), 分析精度总是难以达到要求。谱估计与谱分析的研究工作近年来受到很大重视, 在 AR 与 ARMA 等模型的基础上进行的工作取得了不少新的进展, 并开始在实际的信号处理工作中发挥作用。

随着信号处理技术的发展和器件在速度与集成度方面的进展, 自适应技术在各个领域中的研究工作与实用发展也很快。雷达中的自适应滤波、语言处理中的自适应预测、通信中的自适应信道估值等已广为应用。自适应天线等已成为令人瞩目的研究课题。

二、数字信号处理概要

在本节中我们将简要叙述数字信号处理所涉及的基本内容。

1. 信号的抽样与编码——A/D 变换

模拟信号按照奈奎斯特定理用两倍于信号带宽的频率进行抽样, 便能得到信号的离散样值 (见图 1-2)。再使用编码器将该离散样值变换成数字信号。这即为 A/D 变换。

具体说来, 一般 A/D 变换器包括三个部分 (参见图 1-3)。

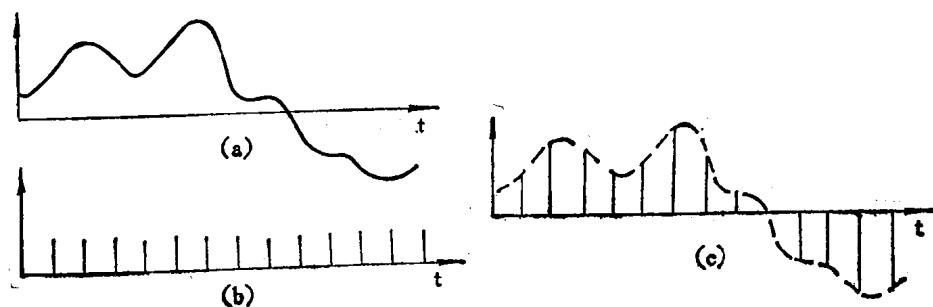


图1-2 模拟信号的抽样

(a) 模拟信号; (b) 抽样脉冲; (c) 抽样信号。

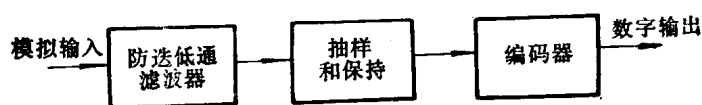


图1-3 A/D 变换器的工作过程

为防止混迭效应 (Aliasing Effect), 模拟信号首先要经过防混迭低通滤波器处理, 使它保持小于抽样频率二分之一的带宽, 送到抽样保持电路。

抽样保持电路是在由抽样脉冲控制的模拟开关的输出端, 并联适当容量的电容器构成的, 它必需后接足够高的阻抗以利于保持电压。在抽样脉冲的控制下, 模拟开关通过模拟信号的幅度抽样值, 将之寄存在电容器上, 供给编码器编码, 如图 1-4 所示。

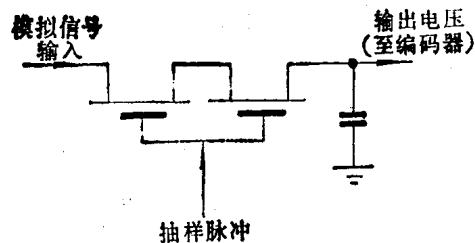


图1-4 抽样和保持电路

编码器分为串联与并联两种。串联型又名逐次逼近型, 它由比较器、控制逻辑和 D/A 变换器组成 (见图 1-5(a))。信号从比较器的一端输入, 与比较器另一输入端的

电压（从D/A变换器来）相比较，产生一位判决结果（是“0”或是“1”）。这个判决结果同时加到控制逻辑的输入端，在时钟的驱动下产生下一位数字参考电压。这个参考电压经D/A变换成新的模拟参考电压，提供给比较器，由此获得新的比较判决值。如此反复几次，就在比较器的输出端获得几位字长的串行输出数字样点值。

并联型的基本结构示于图 1-5(b)。它由 $2^N - 1$ 个比较器（N为数字信号的 字长）从电阻分压器的各个分压端取得电压作为参考，各自与模拟输入电压进行比较，比较的结果送到译码器，译成数字信号输出。

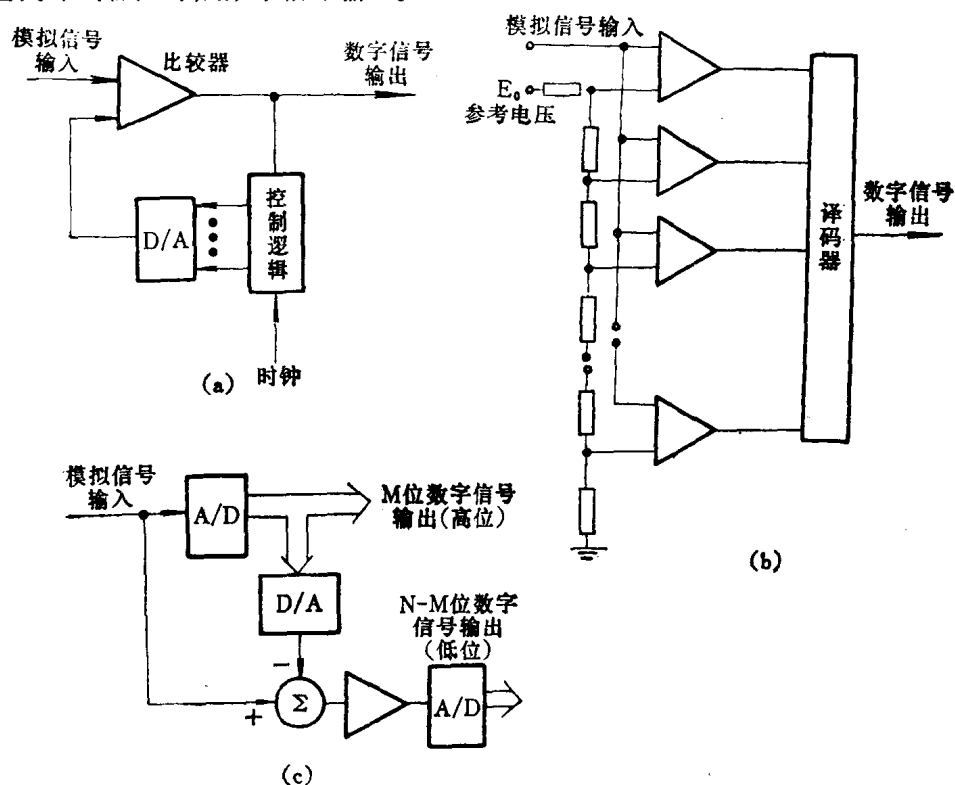


图1-5 A/D变换器

(a) 串联型；(b) 并联型；(c) 组合型。

在实际应用中，串联型花费的器件少得多，但速度较慢（一般为几十微秒量级）。并联型速度很快（可达几十毫微秒量级），但使用的器件很多，价钱昂贵。因此前者适用于要求速度不很高的一般场合，而后者只适用于速度要求很高而位数又不多的场合。

折衷的方案是组合型（见图 1-5(c)）。从图中可以看出，N位数字信号是经由两个步骤取得的。首先进行M位A/D变换，这是一种较“粗”的变换，位数较少。在需要快速时也可以采用并联型。它的数字输出经过D/A变换恢复成模拟电压后与模拟输入电压相减，并加以适当放大。接着进行N—M位进一步“细”化的A/D变换。若也需快速，可采用并联型。这个A/D变换结果产生N—M位数字信号输出。它与前述的M位数字信号输出合并起来，构成N位A/D变换数字信号输出。由上述可以看出，在两只A/D变换器都采用并联型的情况下，其合成速度比N位并联型略慢，但仍较串联型快得多，其复杂程度却比N位并联型大大降低，是一种比较实用的方式。

A/D变换器是数字信号处理中非常重要的接口器件，除上述几种典型的方法外，还

有多种适用于特定环境应用的办法, 如计数器法、电压时间变换法等。

通常 A/D 变换大都应用于 PCM(脉冲编码调制) 方式。在数字信号处理的某些算法中, 为了减免多位乘法运算(因它耗时或耗费器件过多), 代之以符号乘法运算(即一位乘法运算), 便要求 A/D 变换使用 ΔM (即 Δ 调制) 方式。这种 A/D 变换获得的是 1 位“0”、“1”序列, 而不是 PCM 多位数字样值。在某些场合下, 使用这种方式, 可以简化设备, 降低成本。但由于使用这种方式需用较高的抽样频率, 还带来一些新的问题, 需作专门处理。至今 PCM 方式仍是 A/D 变换的主要方式。

随着半导体工艺和集成电路技术的发展, A/D 变换器不仅在速度上达到一个新的水平(转换时间达几百纳秒甚至更小), 其集成规模也逐步扩大, 摆脱了用中、小规模器件拼搭的局面, 不仅能把整个编码器做在一个单片内, 而且包含了更多的电路。AMI 公司的 S3507 就是一种带滤波器的 CODEC 单片(见图 1-6), 可以很方便的应用到一些信号处理系统中。

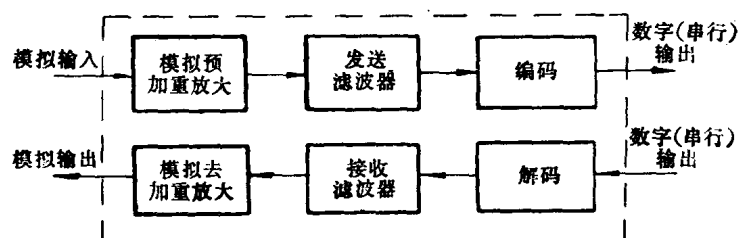


图1-6 AMI S3507器件结构

2. 数字滤波

数字滤波器最初是由模拟滤波器经由各种 Z 变换转换而来的, 但后来的一些设计方法则往往直接从 Z 域入手。在均方或最小最大意义下的数值逼近算法也得到了发展与应用。

数字滤波器可以分为 FIR(有限激冲响应)、IIR(无限激冲响应) 两类。前者是与模拟的横向滤波器(Transversal Filter)相类似, 它的结构示于图 1-7。其差分方程如下:

$$y(nT) = \sum_{i=0}^N a_i X(nT)$$

FIR 滤波器可以从时域的冲激响应开始直接设计; 也可以由频域要求出发, 经傅里叶变换得到它的 Z 域转移函数。这类滤波器不易得到陡削的衰减特性, 但具备了独特的

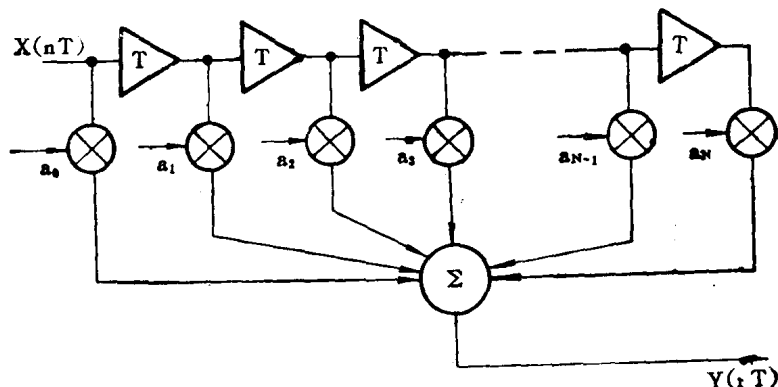


图1-7 FIR数字滤波器

线性相位的优点, 因此有相当广泛的应用。

IIR 滤波器示于图 1-8。它除了包括与 FIR 相同的前向支路部分, 还加上后向支路

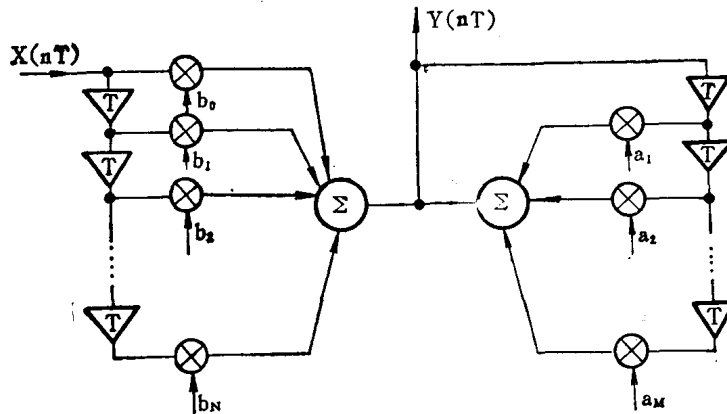


图1-8 IIR数字滤波器

部分, 其差分方程为

$$y(nT) = \sum_{k=0}^N b_k X(nT - kT) - \sum_{m=0}^M a_m y(nT - mT)$$

IIR 滤波器易于设计出陡峭的过渡带衰减特性。为了获得同样的过渡带陡峭度, 只要用较 FIR 滤波器少得多的阶数, 这是它很大的优越之处。但 IIR 滤波器的数据与系数的截断位数对滤波器特性及稳定性存在着比较复杂的关系。为了减免这种复杂性, 保证以合理的字长获得预定的滤波特性和足够的稳定性, 通常都采用若干个二阶节和一阶节组合结构。常用的二阶节级联方式有串联式 (Cascade form) 及并联式 (Parallel form) 两种。由于串联式使用乘法较少, 所以应用要更多些。IIR 滤波器的 Z 域转移函数的级联形式为

$$H(Z) = \prod_{i=1}^N \frac{b_{0i} + b_{1i}Z^{-1} + b_{2i}Z^{-2}}{1 + a_{1i}Z^{-1} + a_{2i}Z^{-2}} \quad (\text{串联式})$$

$$H(Z) = \sum_{i=1}^N \frac{C_{0i} + C_{1i}Z^{-1}}{1 + a_{1i}Z^{-1} + a_{2i}Z^{-2}} \quad (\text{并联式})$$

其结构分别示于图 1-9 及图 1-10。

采用级联方式组成 IIR 数字滤波器时, 所需的一阶节可以看成是具有特定系数的二阶节, 上述两个转移函数的表达式仍可应用。

IIR 数字滤波器有如下几种典型的设计:

- (1) 最平幅度特性数字滤波器;
- (2) 切比雪夫特性数字滤波器;
- (3) 椭圆特性数字滤波器。

这几种特性的数字滤波器都采用类似的设计步骤。从模拟幅值均方函数定阶, 经过解析延拓, 获得标称低通滤波器的转移函数, 然后按照特性模式要求 (是要求低通、高

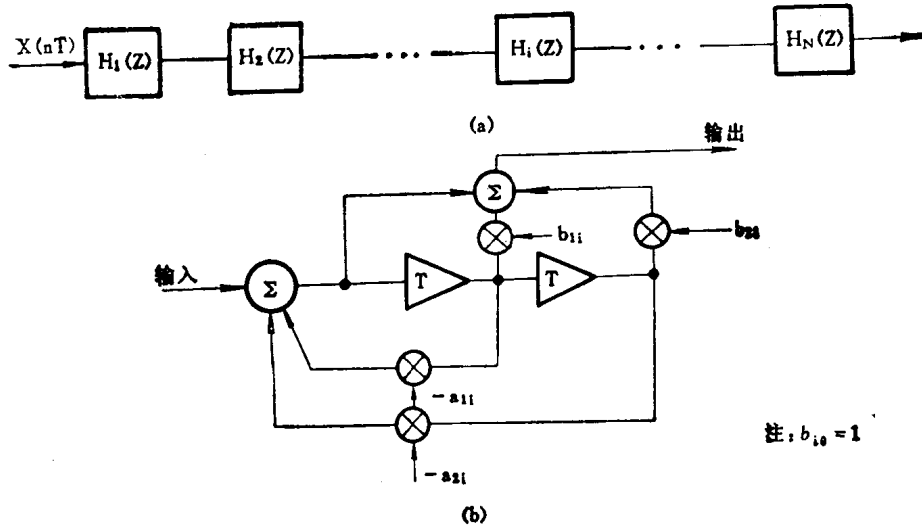


图1-9 串联式IIR数字滤波器
(a) 级联方式; (b) 二阶节 $H_i(Z)$ 内部结构。

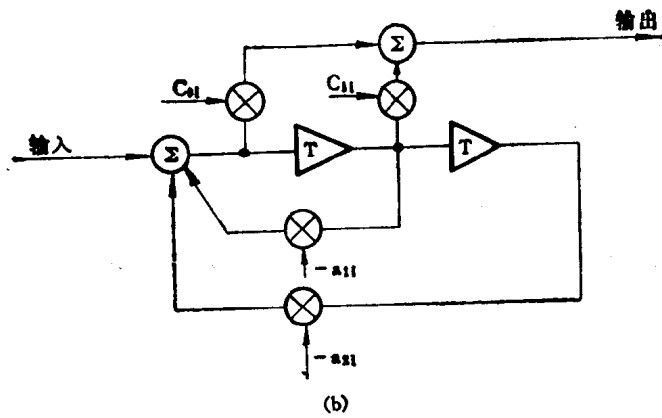
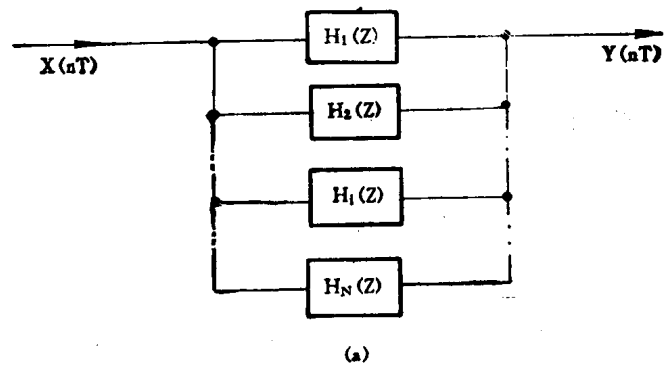


图1-10 并联式IIR数字滤波器
(a) 级联方式; (b) 二阶节 $H_i(Z)$ 内部结构。

通、带通或带阻), 进行标称到非标称的转换。这种转换可以在 Z 变换之后, 也可以在 Z 变换之前。在经过 Z 变换获得 Z 域转移函数之后, 系数值相应产生, 同时可以计算出转移函数零点和极点, 以及构成级联方式所需的二阶级联转移函数的表达式。

3. 快速傅里叶变换 (FFT)

传统的频谱分析工具——傅里叶变换, 在信号处理史上发挥了重要作用。在信号处理技术进入离散域之后, 演变成为离散傅里叶变换 (DFT), 但由于运算能力的限制, 难以广泛应用。自 1965 年快速傅里叶变换算法问世之后, 才进入广泛的实用阶段。

离散傅里叶变换定义为

$$X(m) = \sum_{k=0}^{K-1} x(k) \exp\left(-j\frac{2\pi mk}{K}\right) \quad m = 0, 1, \dots, K-1$$

式中, $X(m)$ 为频谱第 m 个样点值; $x(k)$ 为时域第 k 个样点值。

它的反变换定义则为

$$x(k) = \frac{1}{K} \sum_{m=0}^{K-1} X(m) \exp\left(j\frac{2\pi mk}{K}\right) \quad k = 0, 1, \dots, K-1$$

若令 $W_K = \exp\left(-j\frac{2\pi}{K}\right)$, 那末, 离散傅里叶变换就可写为

$$X(m) = \sum_{k=0}^{K-1} x(k) W_K^{mk}$$

利用 W_K^k 的周期性, 就可以导出快速傅里叶算法。

常用的快速傅里叶算法为基 2FFT、基 4FFT 及基 4-2FFT 等。这里先讨论一下基 2 算法。对于一个 K 点序列 $x(k)$ 的 DFT $X(m)$, $k=2^i$, 我们将 K 点输入序列分解为两个 $(K/2)$ 点序列 $x(2k)$ 及 $x(2k+1)$, 分别对应于 $x(k)$ 的偶数与奇数样点值, 这样便有:

$$\begin{aligned} X(m) &= \sum_{k=0}^{\frac{K}{2}-1} x(2k) W_K^{2mk} + W_K^m \sum_{k=0}^{\frac{K}{2}-1} x(2k+1) W_K^{2mk} \\ X\left(m + \frac{K}{2}\right) &= \sum_{k=0}^{\frac{K}{2}-1} x(2k) W_K^{2mk} - W_K^m \sum_{k=0}^{\frac{K}{2}-1} x(2k+1) W_K^{2mk} \\ m &= 0, 1, \dots, \frac{K}{2}-1 \end{aligned}$$

这里使用了关系式 $W_K^{K/2} = -1$ 。

由上可知, 计算一个 K 点 DFT, 可以利用两个长度为 $K/2$ 的 DFT 来分开计算。同样, 可以应用四个长度为 $K/4$ 的 DFT 来计算两个长度为 $K/2$ 的 DFT。一直这样推下去, 基 2 FFT 算法计算一个长度为 K 的 DFT 需用的运算量可以大大减少。所需复数乘法次数为

$$M = (K/2) \log_2 K$$

所需复数加法次数 A 为

$$A = K \log_2 K$$

上述方法称为时间抽选法。另一种方法称为频率抽选法。不按时间序列的奇偶来抽

选, 而将K点输入序列分成两个 $(K/2)$ 点序列 $x(k)$ 及 $x(k+K/2)$, 分别对应于 $x(k)$ 的前 $K/2$ 和后 $K/2$ 个样点值。这样一来, 就有:

$$X(m) = \sum_{k=0}^{\frac{K}{2}-1} (x(k) + W_K^{mk/2} x(k+K/2)) W_K^{km}$$

我们分别计算 $X(m)$ 的偶数和奇数样点值。这里用 $2m$ 来代替 m , 作为 m 的偶数值, 则

$$X(2m) = \sum_{k=0}^{\frac{K}{2}-1} \left(x(k) + x\left(k + \frac{K}{2}\right) \right) W_K^{2km} \quad m = 0, \dots, \frac{K}{2} - 1$$

用 $2m+1$ 来代替 m , 作为 m 的奇数值, 则

$$X(2m+1) = \sum_{k=0}^{\frac{K}{2}-1} \left(x(k) - x\left(k + \frac{K}{2}\right) \right) W_K^k W_K^{2km} \quad m = 0, \dots, \frac{K}{2} - 1$$

以这种方法进行推算, 称为频率抽选法。可以证明, 频率抽选法与时间抽选法所需的运算量相同。

基4 FFT 算法是将K点输入序列 $x(k)$ 分解为4个 $K/4$ 点序列, 使之对应于 $x(4k)$ 、 $x(4k+1)$ 、 $x(4k+2)$ 和 $x(4k+3)$ 。这里 $k = 0, \dots, \frac{K}{4} - 1$ 。这样, $X(m)$ 可以写成下式:

$$X(m) = \sum_{l=0}^3 W_K^{lm} \sum_{k=0}^{\frac{K}{4}-1} x(4k+l) W_K^{4km}$$

由于 $W_K^{K/4} = -j$, 便有

$$\begin{aligned} X\left(m + \frac{K}{4}\right) &= \sum_{l=0}^3 (-j)^l W_K^{lm} \sum_{k=0}^{\frac{K}{4}-1} x(4k+l) W_K^{4km} \\ X\left(m + \frac{K}{2}\right) &= \sum_{l=0}^3 (-1)^l W_K^{lm} \sum_{k=0}^{\frac{K}{4}-1} x(4k+l) W_K^{4km} \\ X\left(m + \frac{3K}{4}\right) &= \sum_{l=0}^3 j^l W_K^{lm} \sum_{k=0}^{\frac{K}{4}-1} x(4k+l) W_K^{4km} \end{aligned}$$

运用上述公式每次将 DFT 的长度减少到四分之一, 逐次进行下去。加上利用正弦和余弦函数的对称性, 基4算法需用的运算量总计较基2为少。

当K不是某一2的整数幂时, 可以利用混合基的方法, 这就是基4-2 FFT 等产生的原由, 这里不再详述了。

§ 1-3 信号处理的算法特点

在广泛使用数字电子计算机的今天, 信息的运算与处理类型很多。当今应用较多的数据库和未来的知识库都大量运用逻辑算法。与之相比较, 信号处理主要处理现实世界

信号, 具有很多独特之处。

一、信号处理以算术运算为主体

迄今为止, 各种信号处理最终都归结为可用算术运算来完成的计算过程。譬如, 数字滤波器是以 Z 变换为基础的, 它所导出的差分方程, 完全可以用算术运算来完成。又如FFT算法中, 除了各种指数函数需以查表方式提供外, 其余运算过程全为乘或加。在谱估值方面, 最大熵法的计算过程可最终归结为一系列代数方程的算术运算。

二、信号处理算法运算量大要求高速

信号处理面向的处理对象是十分复杂的。譬如, 自然图象、语言、各类噪声及各种生理信号等。这类信号的描述要求足够的精度。由于大多具有时变性质, 这就要求运算处理经历多个过程。因此, 计算机应该具有相当大的容量以储存足够长的信号样品, 同时具有一定长度的字长以适应精度的需要。更为重要的是, 信号处理要求运算速度较高。即使进行非实时运算处理, 也常要求相当高的速度。譬如, 一般的语言的分析与合成, 使用每秒100万次的计算机, 10s的语言样品也需费时十几分钟以上。不少信号处理应用要求实时。譬如, 声码器要求在125 μ s的时间间隔内完成几百次以上的运算, 至少相当于每秒数百万次到千万次的运算速度。在通信、雷达等领域内, 有些场合要求比上述例子更高的运算速度。

三、信号处理算法常具有某些特定模式

由于信号处理算法本身的特点, 在运算中往往频繁出现某种特定的运算模式。譬如在FIR数字滤波器和FFT中, 大量使用乘法—累加—乘法—累加……的重复模式。在各类数字滤波器中, 数据的连续递推移位(在方程中相当于乘以 Z^{-1})使用十分频繁。调用一批固定系数组成的常数表也是信号处理中常用的操作。这些都说明信号处理算法存在着一些常用的特定模式。

四、信号处理要求专门的接口

首先, 从信号的特点来看, 自然界信号常以模拟形式呈现, 我们又主要以数字方式来处理, 因此, 需要使用A/D、D/A变换器。另外, 从运算的特点来看, 由于信号处理常要求整个系统高速运行, 所以各部分之间的接口必需具备高速吞吐能力, 才能避免成为“瓶颈”。高速接口常为信号处理系统不容忽视的要求。

上述一系列特点, 说明信号处理对系统的要求与一般处理系统有所不同, 要求我们在设计信号处理系统时, 必须认真加以考虑。适应这些特点, 熟悉与掌握这方面的技术, 才能成功地设计出各类信号处理的设备与系统。

§ 1-4 信号处理技术的应用

信号处理自诞生以来, 就得到多方面的应用。譬如, 无线电信号的发送与接收, 雷达脉冲信号的处理, 地震信号的处理, 声纳信号的处理等, 这些都是众所周知的。随着现代科学技术的发展, 特别是LSI、VLSI和数字电子计算机技术的发展, 数字信号处

理技术取得了较快的进展,应用范围也日益扩大,几乎涉及了人类生活的各个方面。下面,我们列举出一些方面,并加以简要叙述。

一、通信信号的发送与接收

目前,通信技术中的编码、调制、变换及其相应的逆过程,广泛采用了数字信号处理技术。其中,信号的成形、分路、移相、发送与接收滤波、锁相控制环路等,大量使用数字滤波器。在调制解调技术中,广泛使用自适应信道均衡器。目前,自适应回声抵消技术已成功地应用在传输系统中。交换网中的信令信号的检出也采用数字滤波器等信号处理技术。总之,数字信号处理已成为通信中最关键的技术之一。

二、信号记录与重放

与前述相类似,信号的记录与重放也同样应用了信号处理技术。不同的是,这里以存储介质(譬如磁带等)代替了通信中的有线或无线传输介质。研究如何将信号通过适当的编码与调制方式处理后加以存储,以及在重放时通过相反的处理步骤,使信号能不失真地再现,这就需要解决信号的滤波与均衡等问题。在记录设备的伺服控制环路及时基数字恢复等方面,数字信号处理也是其中的关键技术。

三、语音处理

语音处理是信号处理特别是数字信号处理应用最早最成熟的一个领域。由于语音频带一般限制在20kHz以下,很多情况下4kHz已敷应用。对于这样窄的带宽,目前的工艺水平已经能够为它研制出具有相当高实时处理能力的器件。目前的一般计算机系统也能提供给语音处理课题以相当的处理能力。因此,语音处理中的数字信号处理发展较快。

语音的分析与合成广泛应用了数字信号处理。譬如,数字滤波、线性预测、FFT、同态滤波及对数倒频谱等。近年来,谱估值技术在语音处理中也获得了一定的应用。

在语音的分析与合成的基础上,发展了各种实用的语音处理技术,如语音识别、声码通信、讲话人证实、人工语言综合等。这些都具有重要的实用价值。在第五代计算机中,语音接口将成为主要特征之一,语音处理将更加显得重要。

四、图象处理

图象处理是较新的学科。它的任务是根据不同的要求,对图象进行各种加工处理,以获有用的结果。它在国民经济(如资源勘探等)、国防建设(如军事侦察等)等方面,都有重要的作用。

图象处理有多种类别,如图象增强、图象平滑、图象锐化、图象复原等。图象处理大量采用二维数字信号处理技术,如二维卷积、二维FFT、二维数字滤波等。

在处理操作方面,图象处理常采用机器处理与人的感官密切结合的交互方式(Interactive mode),以不十分大的代价,较迅速地获得良好的效果。

图象处理要求较大的内存。对于一幅256(行) $\times$ 256(列)每一象元用8位码来表示的图象,需用帧存储器为64K Bytes。若希望再提高每帧象元数和象元分层数,所需存储量将随要求而显著增加。另外,由于二维数字信号处理运算量很大,图象处理要求