

张元
汪庆宝 编著
方穗明

数字信号 处理

北京工业大学出版社



(京)登 95 第 212 号

内 容 简 介

本书是数字信号处理导论性教材,内容包括快速傅里叶变换和数字滤波器两部分。全书共九章:绪论,离散时间信号分析,FFT 及其软、硬件的实现方法,离散时间系统分析和数字滤波器分析,数字滤波器的运算结构和软、硬件的实现方法,数字滤波器的设计方法,自适应数字滤波器,数字滤波器的有限字长效应。

本书体系结构新颖、独特;内容少而精;基本原理叙述深入、详尽,物理概念清楚,公式推导完整;联系实际,配有较多的例题、应用实例和应用程序,并有小结和习题,便于自学。

本书可作为无线电类专业和自动控制类专业大学生的教材,也可供有关学科工程技术人员和教师参考。

数字信号处理

编著:张 元 汪庆宝 方穗明

北京工业大学出版社出版发行 社址:北京朝阳区平乐园 100 号

徐水宏远印刷厂印刷 各地新华书店经销

开本: 1/32 850mm×1168mm 印张: 15.625 字数: 390 千字

印数: 0001~2500 册 1995 年 11 月第 1 版第 1 次印刷

ISBN 7-5639-0466-2/T·48 定价: 12.00 元

前 言

本书是在北京工业大学电子工程学系开设的《数字信号处理》课程所用讲义的基础上,经过清华大学冯一云教授和北方交通大学吴湘琪教授的审定,由三位作者修改、补充编写而成。在这里,首先向两位审定教授表示衷心的感谢。

作为数字信号处理导论性的教材,本书只涉及数字信号处理的两个基本内容——数字滤波器和快速傅里叶变换(FFT)。全书共九章,除绪论外,分为三个部分。第二、三章是第一部分,讲述离散时间信号分析和FFT。第四章是第二部分,讲述离散时间系统分析和数字滤波器分析。第五、六、七、八、九章是第三部分,讲述数字滤波器的综合,包括设计、实现方法和有限字长效应。

与一般教材的体系结构不同的是,本书把离散时间信号分析和离散时间系统分析各自编为一章,分别讲述,主要目的是为了把离散时间系统的五种分析方法集中讨论,以便揭示其相互间的联系、特点和各自在数字信号处理中的用途,尤其对什么是数字滤波器,它是如何工作的,能有个深刻的了解。作者认为,这样做,比把离散时间信号分析和离散时间系统分析交织在一起讲述,条理清楚,便于达到上述目的。自适应数字滤波器本是研究生《数字信号处理》课程的内容,鉴于它的广泛应用,我们认为,现

在引进本科生的教材是适宜的。自适应数字滤波器涉及估值理论，可视情况取舍。快速傅里叶变换和数字滤波器的硬件实现，应成为《数字信号处理》课程必不可少的内容，本书在第三章和第五章的有关部分重点进行了讨论。为了便于自学，本书列举了大量的例题、应用实例和应用程序，并且每章有小结和习题。

限于作者水平，不妥和错误之处在所难免，恳切希望读者给予批评指正。

编者

1995年2月

目 录

第一章 绪论	(1)
§ 1.1 什么是数字信号处理	(1)
§ 1.2 数字信号处理系统的突出优点	(6)
§ 1.3 数字信号处理的应用领域	(8)
§ 1.4 数字信号处理的内容与历史简介	(15)
§ 1.5 数字信号处理的实现	(17)
第二章 离散时间信号分析	(21)
§ 2.1 离散时间信号	(22)
§ 2.2 采样	(30)
§ 2.3 z 变换	(40)
§ 2.4 傅氏变换	(61)
§ 2.5 离散傅里叶变换 (离散傅氏变换)	(70)
小结	(85)
习题	(86)
第三章 快速傅里叶变换 (FFT)	(92)
§ 3.1 DFT 的运算特点	(93)
§ 3.2 时间抽取法	(95)
§ 3.3 频率抽取法	(104)
§ 3.4 IFFT 的运算方法	(108)

§ 3.5	FFT 的软件实现	(111)
§ 3.6	FFT 的专用硬件实现	(123)
§ 3.7	CHIRP— z 变换 (CZT)	(136)
§ 3.8	应用 FFT 的仪器设备	(141)
小结	.....	(144)
习题	.....	(146)
第四章	线性时不变离散时间系统的分析	(148)
§ 4.1	离散时间系统的定义和分类	(149)
§ 4.2	系统的差分方程分析法	(153)
§ 4.3	系统的线性卷积分析法	(162)
§ 4.4	系统的 z 变换分析法	(168)
§ 4.5	FIR 系统的离散傅氏变换分析法	(176)
§ 4.6	系统的傅氏变换分析法和数字滤波器的分析	(190)
小结	.....	(205)
习题	.....	(206)
第五章	数字滤波器的实现方法	(209)
§ 5.1	IIR DF 的运算结构	(210)
§ 5.2	FIR DF 的运算结构	(222)
§ 5.3	数字滤波器的软件实现	(231)
§ 5.4	数字滤波器的硬件实现	(234)
小结	.....	(244)
习题	.....	(245)
第六章	无限长单位脉冲响应 (IIR) 数字滤波器 的设计方法	(247)
§ 6.1	IIR DF 设计的特点	(247)
§ 6.2	脉冲响应不变法	(250)
§ 6.3	双线性变换法	(256)
§ 6.4	巴特瓦兹数字滤波器的设计方法	(261)

§ 6.5	切比雪夫数字滤波器的设计方法	(270)
§ 6.6	将原型低通数字滤波器变换成 其它数字滤波器 (z 平面变换法)	(283)
§ 6.7	IIR 数字滤波器的计算机辅助 设计 (优化设计技术)	(294)
小结	.....	(305)
习题	.....	(306)
第七章	有限长单位脉冲响应 (FIR) 滤波器 的设计方法	(308)
§ 7.1	线性相位 FIR DF 的特点	(308)
§ 7.2	窗口设计法	(318)
§ 7.3	频率采样设计法	(344)
§ 7.4	FIR 数字滤波器的计算机辅助设计 ——切比雪夫 (Chebyshev) 逼近法	(356)
§ 7.5	数字滤波器的应用	(371)
小结	.....	(378)
习题	.....	(381)
第八章	自适应数字滤波器	(383)
§ 8.1	自适应 DF 的基本原理	(383)
§ 8.2	LMS 递推算法	(388)
§ 8.3	自适应数字滤波器的应用	(391)
第九章	数字滤波器的有限字长效应	(400)
§ 9.1	数的定点制表示与量化噪声通过系统	(400)
§ 9.2	数字滤波器定点制运算中的有限字长效应	(408)
§ 9.3	系数量化对数字滤波器的影响	(417)
小结	.....	(427)
习题	.....	(428)
附录一	IIR 数字滤波器最小 p 误差法设计	

的计算机程序.....	(431)
附录二 FIR 数字滤波器最佳一致逼近的计算机程序.....	(465)
附录三 用 C 语言编写的 FFT 程序	(485)
参考文献.....	(488)

第一章 绪 论

计算机科学和信息科学的迅猛发展正在深刻地改变着信号处理的面貌，由此而形成的一门新学科就叫数字信号处理。

本章讲述什么是数字信号处理、数字信号处理的突出优点、数字信号处理的应用领域、数字信号处理的内容和历史简介，以增强读者学习本课程的目的性，激发学习本课程的兴趣，并了解数字信号处理的概貌。

§ 1.1 什么是数字信号处理

顾名思义，凡是利用数字计算机或专用数字硬件，对数字信号所进行的一切变换或按预定规则所进行的一切加工处理运算，例如滤波、检测、参数提取、频谱分析等，都叫数字信号处理。

数字信号处理有两个基本任务——信息的重新排列和信息的压缩。信号是传输信息的媒介。信号处理不能增加信息，但可以通过变换或加工信号，例如计算机辅助断层成像术 (CAT)、图像增强、图像去模糊、频谱分析和调制等，重新排列信息，以便更容易地识别、分析和传输它。信息压缩是把那些无关紧要的信息去掉。例如，人们在观察雷达站反射波时，通常只对少数几个信息感兴趣，即：是否有目标？如果有的话，是我方的还是敌方的？在什么方位？距离和速度各是多少？除此之外，接收机提供的有关气象、人为雷达干扰、附近建筑物和接收机噪声等信息，是无关紧要的，可以从上述所需信息中分离出来，去掉不要。信号处理能实现这一目标。信息压缩的另一个例子是有信息损失的信号

处理运算, 包括参数估计、特征提取、滤除混杂的噪声和干扰。

数字信号处理是从本世纪 60 年代初兴起的。它一经问世, 便迅速地渗透到很多领域, 取代传统的模拟处理方法, 对信号进行数字加工处理, 成效显著, 受到人们极大的重视。当数字系统可以很好地模仿模拟系统时, 人们认识到, 数字系统还可以完成更多的功能。由于这种认识和数字硬件工艺的有力推动, 所以人们便提出了一些信号处理方法, 只为数字系统所特有, 没有与其等效的模拟原型。今天, 数字信号处理正在蓬勃发展, 日臻完善。数字信号处理的应用潜力巨大, 前程似锦, 现在仍然是人们潜心研究的热点之一。

常用的数字信号处理系统如图 1.1 所示。图中, 信号源是待

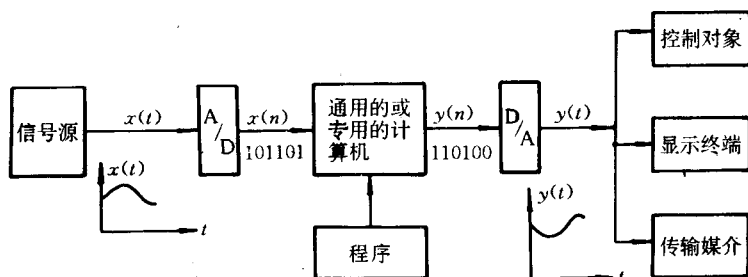


图 1.1 数字处理系统

处理的对象, 一般是模拟信号, 例如雷达、声纳接收的回波信号, 通信的话音信号, 电视的图像信号和自动控制系统中由传感器获得的感应信号等。模拟信号需经 A/D 变换器变成数字信号序列, 才能加到通用的或专用的数字计算机进行运算处理。处理的结果仍然是数字信号。为了控制某种对象, 需将输出的数字信号由 D/A 变换器恢复成模拟信号。有时, 可由显示器将结果显示出来。为了远程应用, 还需将信号送给传输设备, 通过信道传送到其它地方, 以完成预定的任务。

由图 1.1 可见, 数字信号处理的核心部件是通用的或专用的数字计算机, 称为数字信号处理器或数字系统, 例如数字滤波器等。A/D 变换器和 D/A 变换器是专用的硬件设备, 专有课程介绍。控制和显示装置也不属于数字信号处理的范围。我们要研究的只是如何编制各种算法, 搭成专用的数字硬件, 按着编制的计算程序, 完成预定的数字信号处理任务。

下面, 我们按数字信号处理系统的不同任务, 介绍它的四个例子。

1. 数字频谱仪

频谱分析是信号分析中常用的方法之一, 在过去的模拟系统中, 主要靠滤波器来实现。由于器件的限制, 滤波器的性能不能满足要求, 例如: 过渡带太宽、频率分辨率低、特性的一致性差、改变频率和频带不灵活等。特别是在低频应用时, 电感、电容体积很大, 有些原理上可行的方案实际上不能实现, 限制了甚低频信号的频谱分析。

现在采用数字技术, 如图 1.2 所示, 先将模拟信号 $x(t)$ 经 A/D 变换器变换成数字信号 $x(n)$ 。根据 $x(n)$, 专用数字计算机就能按 FFT (快速傅里叶变换) 或最大熵法计算出 $x(t)$ 的频谱或功率谱。谱由显示器显示出来, 消除了上述限制, 大大提高了分辨率。

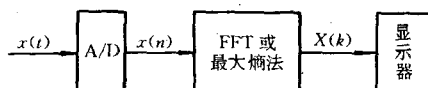


图 1.2 数字频谱仪

频谱分析的重要应用之一是在声纳方面。在海岸实时警戒系统中, 核心器件是快速傅里叶分析仪。设置在海岸的若干个水听器检测海洋水域中舰船和潜艇的航行噪声, 经一定的模拟处理, 送到监视站, 由快速傅里叶分析仪进行实时分析, 包括滤波和多次

平均,求得被测信号的频谱。然后,将此信号的频谱与预先存储的各种标准谱进行比较,识别出舰艇的类型、航速和航向,发出警报信号。

2. 数字滤波器

设输入模拟信号 $x(t)$ 包含有用信号、无用信号和干扰噪声,采用数字滤波器 (DF) 进行滤波处理,提取有用信号 $y(t)$,如图 1.3 所示。

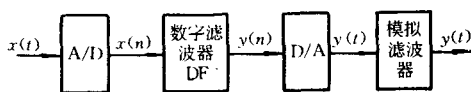


图 1.3 模拟信号的数字滤波系统

A/D 变换器将模拟信号 $x(t)$ 转换成数字信号 $x(n)$ 。数字滤波器对 $x(n)$ 进行数字滤波,输出数字信号 $y(n)$ 。D/A 变换器再将数字信号 $y(n)$ 变成抽样、保持的模拟信号,经模拟滤波,输出一个有用的模拟信号 $y(t)$ 。数字滤波器可以实现模拟滤波器难以实现的高性能的复杂滤波特性,例如雷达用的梳型滤波器、图像处理用的线性相位滤波器等。1964 年,美国推进实验室对“徘徊者 7 号”太空船发回的四千多张月球照片进行数字处理,获得了空前未有的清晰度,令人惊奇不已,开创了数字图像处理的新纪元。其中,所使用的数字信号处理方法之一是图像增强。若原始图像信号很弱,图像不清楚,则可采用同态滤波处理,提高对比度,图像中的轮廓细节就会清晰地显现出来。再者,所使用的数字信号处理方法之二是图像恢复。若图像失真、模糊,经一定的滤波处理,就能恢复其本来面目。

3. 数字式工业过程控制系统

其方块图如图 1.4 所示。输入模拟信号 $x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)$ 来自 N 个不同的工业系统的传感器,分别依次通过多路器,由

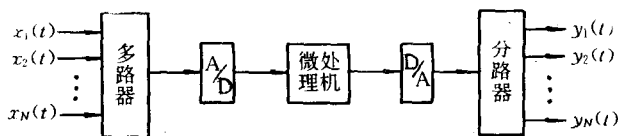


图 1.4 数字式工业过程控制系统

A/D变换器变为数字信号,加到微处理机,进行规定的功能运算处理。然后,经D/A变换器和分路器,输出 N 个所需的模拟信号

$$y_i(t) = f[x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)] \quad (i = 1, 2, \dots, N)$$

分别加到 N 个不同的伺服控制装置,进行工业过程控制。图中,微处理机就是数字信号处理器,其所完成的复杂运算往往是模拟处理器难以实现的。

飞机自动驾驶仪极类似于上述的数字式工业控制系统。飞机内的 N 个不同的传感器测量飞机飞行的 N 个状态参数,并将它们转换成电信号 $x_1(t), x_2(t), \dots, x_N(t)$ 。经模拟滤波,消除了传感器的输出噪声,由A/D变换器变换成数字信号,加到微处理机(此处叫数字自动驾驶仪)进行处理,产生所要求的数字输出。再经D/A变换器和分路器,输出 N 个不同的模拟信号 $y_1(t), y_2(t), \dots, y_N(t)$,分别加到飞机的 N 个不同控制部件的控制器,控制飞机按预定的航线自动飞行。

4. 信息提取与识别

信息提取与识别系统,如图1.5所示,将待识别的输入信号经A/D变换器送到分析装置,按着不同的分析方法提取有关的信息特征。在识别装置中,预先存入各种各样的信息特征,组成一个样本特征库。将提取所得的、待识别的信息特征逐个与库内的样本特征进行比较,把比较的结果记录下来,选取其中特征最接近的信息作为识别输出。根据识别输出,就能做出各种预期的动作,例如控制打印记录仪,控制计算机作下一步操作等。目前已经取得相当

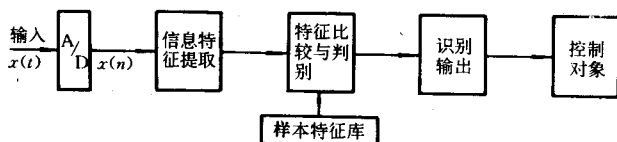


图 1.5 信息提取与识别系统

成果的有语音识别、印刷字符识别和图形识别等。口呼话音数字的识别率已经很高,达到了控制计算机算题的程度(口呼命令操作机械手动作)。图形识别在工厂产品自动分选方面也已有应用。在国防上,飞机机型的识别也是很重要的课题。信息识别虽然取得了不少成果,但对需要来说,待研究的课题还非常多,将会遇到的技术和理论上的困难也会很大,例如书写文字的识别就很困难。可以想象,若计算机能代替眼睛、耳朵的部分作用,那时人类自动化的程度将会发生巨大的变革。识别工作成果与人工智能技术的结合,不知会出现多少现在难以预测的科学成就。

§ 1.2 数字信号处理系统的突出优点

从上面列举的例子不难想象,与模拟系统相比,数字系统具有如下一些突出优点。

(1) 精度高: 我们知道,在模拟系统中,元器件精度要达到 10^{-3} 以上已经不容易了,而数字系统 17 位字长可达 10^{-5} 的精度,这是很平常的。因此,在很多高精密的系统和测量中,数字技术是很有效的工具,甚至有时只有采用数字技术,否则不可能达到精度的要求。

(2) 可靠性高: 模拟系统中的各种参数都有一定的温度系数,都随环境条件而改变,并且容易出现感应、杂散效应甚至振荡等,而数字系统受这些因素的影响要小得多。

(3) 灵活性高：一个数字系统的性能主要是由乘法器的系数决定的，而这些系数是存放在系数存储器中的。只要对这些存储器输入不同的数据，就可以随时改变系统的参数，从而得到不同的系统。这对实验研究尤其便利。

此外，数字处理所具有的灵活性还表现在它能利用一套计算设备同时处理几路信号，如图 1.6 所示。这就是“时分”应用。当各路输入信号分别给多路器输入一些序列值时，同步系统就控制它们在时间上前后错开，并依次进入处理器。处理器在算完一路

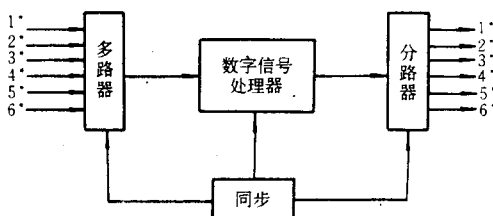


图 1.6 时分多路数字信号处理系统

结果以后，再算第二路的结果。在各路输入信号输入第二个序列值以前，处理器已将各路信号的第一个序列值全都算完了，并将结果分别送给了各路输出。因此，对每一路信号来说，都好像是单独占用着处理器一样。处理器的运算速度越高，它所能处理的信道也越多，因而功能也越灵活。

就是在处理器内部，一些基本运算环节也可以复用。例如每一个输入序列，循环地通过一节滤波器三次，则一节滤波器的作用就等效为一个三节级联的高阶滤波器，从而节省了硬件，降低了成本，扩大了功能。

(4) 便于大规模集成：数字部件具有高度的规范性，它没有模拟网络中的各种电感器、电容器及其它非标准件，便于大规模

集成、大规模生产。特别是对低频信号，如在遥测中或地震波分析中需要过滤的数赫或数十赫的信号，用模拟网络处理时，电感器、电容器的数值和体积都将大到惊人的程度，甚至不可能获得很好的选择性。这时采用数字信号处理就将特别显示出体积、重量和性能的优越性来。

(5) 数字系统可以获得很高的性能指标：例如，有限冲激响应数字滤波器可以实现准确的线性相位特性，这些特性用模拟系统是很难达到的。

(6) 多维处理：数字系统的一个重大特点是可以具备庞大的存储单元，因而可以将一帧或数帧的图像信号或地震波的传播信号存储起来，实现二维甚至多维的处理，如二维滤波及二维谱分析等。

(7) 处理方法简单：对很多应用而言，数字信号处理方法比其它方法更为简单。对另外一些应用，则可能根本不存在其它方法，例如可以设计数字系统使其具有自适应性。

同一切技术领域一样，数字系统也有自己的应用局限性。目前，一般来说，数字系统的速度还不算高，因而不能处理很高频率的信号。另外，数字系统的设计和结构复杂，价格较高，对一些要求不高的应用来说，还不宜使用。

§ 1.3 数字信号处理的应用领域

自从 20 世纪 60 年代以来，数字信号处理的应用已经成为一种明显的趋势。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，指明存在的应用范围以及每个领域中涉及问题的一般性质。

一、语音处理

它是最早采用数字信号处理技术的领域之一。本世纪 50 年代

提出了语音形成的数字模型，经过十多年对语音的分析、综合，证明是正确的。在语音领域，现存在着三种系统。

(1) 语音分析系统：例如自动语音识别系统，它能识别语音，辨认说话的人是谁，而且破译后，能立即作出决断。

(2) 语音综合系统：例如盲人用的自动阅读机、语言失聪人用的语音综合器、声音响应的计算机终端、会说话玩具和家用电器等。在远距离，医生通过电话向中心计算机查寻病历，由计算机回答。这也是语音综合系统的一种，叫数据检索系统。从压缩和编码的语音信号重构能懂语音的很多语音综合系统是可用的，很多仅由两三片集成电路组成。

(3) 语音分析—综合系统：例如语音存储和检索系统，用于电话窃听等。

随着微处理机处理速度的增加和成本的降低，像 IBM 等大的电子公司，现在已能生产出普通而实用的语音识别工具，语音处理技术可能正处在转折点上。

1994 年 10 月，飞利浦公司宣布在语音识别方面取得了突破性的进展，研制的新系统除能识别出 5 万个单词以外，还能识别连续的句子。这项成就使语音识别发展到了足以用于大规模广泛应用的程度。

热心于语音识别的人在谈论用语音识别系统取代键盘、鼠标、听写装置、手迹识别装置以及可能还会取代打字员和电话接线员。有的专家甚至认为：“键盘用不了几个月就会变得过时了，而不是几年。”司法语音识别软件，不再需要反复重述以便让秘书抄写下来，不再需要校对和修正，所以能节省时间。办公室语音识别软件，能处理大量的行政工作，能取代人的大量听写，对律师尤其有用。邮购公司可利用语音处理系统进行电话推销。语音识别系统还可用于语音培训，检查每句话中的每个单词以及发音的速度。此外，对那些不懂得使用计算机的人和打字不娴熟的人，语音识