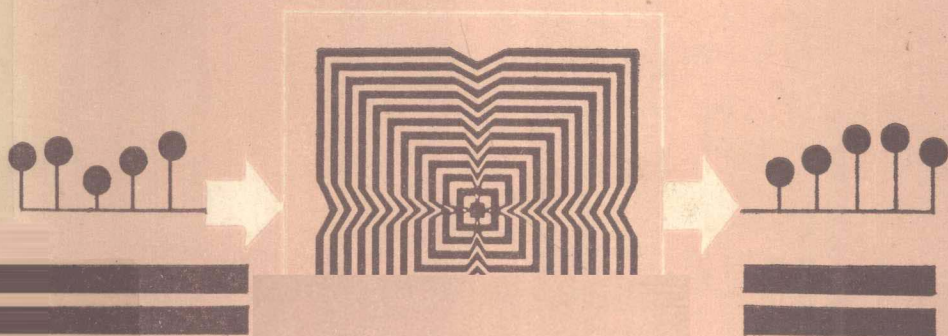


数字信号处理

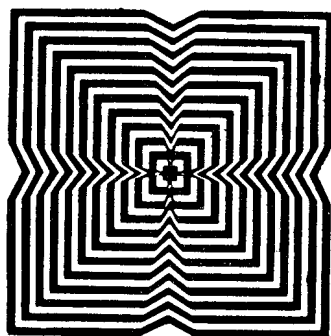
姚天任 江太辉 编著



华中工学院出版社

数字信号处理

姚天任 江太辉 编著



华中工学院出版社

内 容 提 要

本书完整地讨论了数字信号处理的基本理论和基本方法。前四章讨论数字信号处理的理论基础和基本分析方法，第五章详细讨论了实际实现中遇到的重要问题——有限字长效应，第六章讨论了功率谱的应用。

本书配合正文，配有较丰富的例题和习题，并附有习题参考答案。书后附有较详细的参考书目。

本书可作为高等理工科院校无线电技术和信息工程、通信、雷达、声纳、自控和计算机等专业的教科书，也可供有关专业的科研和工程技术人员参考。

前 言

1980年,我们第一次为华中工学院无线电系高年级学生开出了“数字信号处理”课程,采用美国A.V.Oppenheim和R.W.Schaffer所著的同名著作为教材。1985年,在这门课已经开出了五届的时候,我们整理了所积累的讲稿和资料,编写并胶印成讲义。该讲义在无线电技术、信息工程等专业连续使用了三届,也在助教进修班用过一次。使用过这本讲义的老师 and 同学们,给予了我们鼓励,并热情地提出了许多宝贵意见。1986年,华中工学院出版社决定正式出版此书。在出版社的同志和一些老师们的鼓励下,我们开始了本书的编写工作。这本书是在原讲义的基础上,参考了教学中所收集到的意见,全部重新开始编写的。

在本书的编写过程中,我们始终注意到这样三点:第一,内容尽可能少而精,而同时又要便于自学;第二,尽可能联系实际,结合应用;第三,形成自己的体系结构特点。愿望是这样,但在脱稿时,我们却感到力不从心,未能尽如人意。我们的确认识到要编好一本书是多么不容易啊!尽管如此,我们还是希望,在读者的关心和帮助下,今后能把本书改得更好一些。

本书可作为高等理工科院校无线电技术和信息工程、通信、雷达、声纳、自动控制和计算机等专业的教科书,学时可在40至70学时范围内灵活掌握。本书也可供有关专业的科研和工程技术人员参考。

本书第一章至第三章由江太辉执笔,第四章至第六章以及概论由姚天任执笔。

我们感谢葛果行、康华光、郑友明、李任远、陈侃、孙洪和

王殊等同志提出了许多有价值的意见，感谢华中工学院出版社的同志们的辛勤劳动。

作 者

1987年3月

于武汉华中工学院

目 录

概 论	(1)
第一章 离散时间信号和系统分析	(12)
§ 1.1 概述	(12)
§ 1.2 离散时间信号——序列	(13)
§ 1.3 离散时间系统	(17)
1.3.1 线性非移变系统	(17)
1.3.2 系统的稳定性和因果性	(22)
§ 1.4 线性常系数差分方程	(24)
§ 1.5 系统频率响应和离散信号的傅里叶变换	(31)
§ 1.6 连续时间信号的取样	(34)
§ 1.7 Z 变换	(41)
1.7.1 Z 变换的定义	(41)
1.7.2 几种序列的Z变换的收敛域	(44)
1.7.3 逆Z变换	(50)
1.7.4 Z变换的性质和定理	(57)
1.7.5 Z变换与拉氏变换的关系	(66)
1.7.6 系统函数	(70)
习题	(76)
第二章 离散傅里叶变换(DFT)	(83)
§ 2.1 概述	(83)
§ 2.2 离散傅里叶级数及其性质	(84)
2.2.1 离散傅里叶级数	(84)
2.2.2 离散傅里叶级数的性质	(86)
§ 2.3 离散傅里叶变换(DFT)及其性质	(89)
2.3.1 离散傅里叶变换(DFT)	(89)

2.3.2 离散傅里叶变换的性质	(93)
§ 2.4 利用循环卷积计算线性卷积	(100)
§ 2.5 频率取样	(104)
§ 2.6 快速傅里叶变换 (FFT)	(109)
2.6.1 引言	(109)
2.6.2 时间抽选 FFT 算法	(111)
2.6.3 频率抽选 FFT 算法	(121)
2.6.4 IFFT 的计算方法	(129)
§ 2.7 快速傅里叶变换的应用	(132)
2.7.1 利用FFT对信号进行谱分析	(132)
2.7.2 利用FFT计算线性卷积	(137)
2.7.3 分段卷积	(142)
习 题	(146)
第三章 数字滤波器的原理和设计方法	(152)
§ 3.1 概述	(152)
§ 3.2 IIR 数字滤波器的基本网络结构	(153)
§ 3.3 FIR 数字滤波器的基本结构	(159)
§ 3.4 IIR 滤波器的设计方法	(172)
3.4.1 冲激响应不变法	(174)
3.4.2 双线性变换	(178)
3.4.3 数字巴特沃斯滤波器	(182)
3.4.4 数字切比雪夫滤波器	(190)
3.4.5 数字椭圆函数滤波器	(199)
§ 3.5 IIR 数字滤波器的频率变换	(206)
§ 3.6 有限冲激响应数字滤波器的设计方法	(210)
3.6.1 窗函数法设计FIR数字滤波器	(211)
3.6.2 频率取样设计FIR数字滤波器	(225)
习 题	(229)

第四章 离散随机信号	(234)
§ 4.1 离散随机过程的概念	(234)
§ 4.2 随机过程的概率分布特性	(235)
§ 4.3 随机过程的统计平均特性	(238)
§ 4.4 随机过程的时间平均特性	(244)
§ 4.5 相关序列和协方差序列的性质	(246)
§ 4.6 功率谱	(250)
§ 4.7 离散随机信号通过线性非移变系统	(252)
习题	(259)
第五章 有限字长效应	(261)
§ 5.1 有限字长效应引起的误差的分类	(261)
§ 5.2 用不同方法表示负数时量化效应的 不同影响	(265)
5.2.1 定点运算和浮点运算	(265)
5.2.2 原码、补码和反码	(267)
5.2.3 截尾和舍入	(273)
5.2.4 定点运算中的截尾和舍入误差	(273)
5.2.5 浮点运算中的截尾和舍入误差	(276)
§ 5.3 信号由于量化所引入的噪声	(278)
§ 5.4 定点运算中有限字长的影响	(281)
5.4.1 定点运算IIR数字滤波器的量化噪声	(283)
5.4.2 定点运算FIR数字滤波器的量化噪声	(294)
5.4.3 定点运算FFT的量化噪声	(298)
§ 5.5 浮点运算中有限字长的影响	(305)
§ 5.6 系数的量化效应	(317)
5.6.1 IIR滤波器的系数量化效应	(318)
5.6.2 FFT中的系数量化效应	(324)
习题	(325)

第六章 功率谱估计	(330)
§ 6.1 概述	(330)
§ 6.2 估计理论的几个基本概念	(333)
§ 6.3 自相关序列的估计	(338)
§ 6.4 周期图	(343)
§ 6.5 直接变换谱估计方法	(349)
§ 6.6 改善周期图估计质量的途径	(350)
6.6.1 周期图平均法	(350)
6.6.2 周期图加窗平滑法	(354)
6.6.3 修正周期图平均法	(359)
§ 6.7 周期图谱估计方法的实现	(362)
§ 6.8 现代谱估计方法	(377)
6.8.1 随机过程的时间序列模型	(379)
6.8.2 Yule-Walker方程和 Levinson-Durbin 算法	(383)
6.8.3 线性预测谱估计	(387)
6.8.4 最大熵谱估计	(392)
习题	(397)
参考文献	(399)
习题参考答案	(401)

概 论

数字信号处理学科概貌

数字信号处理这一学科，主要研究用数字序列或符号序列表示信号，并用数字计算方法对这些序列进行处理，以便把信号转换成符合某种需要的形式，例如，或者对信号进行滤波，或者进行频谱分析或功率谱估计，或者对信号进行识别等等。

数字信号处理的学科范围的准确划分尚无统一的看法。但上述的关于数字信号处理的主要研究内容的规定，似乎意见还是比较一致的。这意味着，数字信号处理涉及到相当广泛的领域。图01是说明其学科范围的一张联系图。在该图中，我们把数字信号处理所涉及的问题分成两大类，一类是理论问题，另一类是实现问题。数字信号处理的理论是在各个应用领域提出的问题的推动下发展起来的，反过来这些理论又被应用到各个领域中去。数字信号处理的理论，主要是建立在离散时间信号和线性非移变系统理论基础上的。一般来说，信号的数字处理是按以下步骤实现的。首先，根据不同应用领域中具体问题所提出的要求，建立正确的理论模型；然后，将其用一组相互联系的基本运算来表示，这组

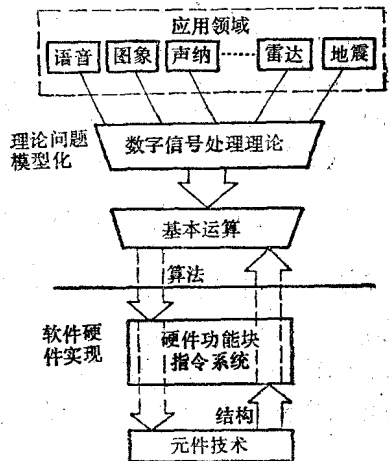


图01 数字信号处理概貌

基本运算之间的联系以及运算所需的参数或数据，都是根据问题的性质和要求确定的；这样，我们就可以用专用数字硬件或通用数字计算机来实现这些算法。无论是专用数字硬件还是通用计算机，它们都是以硬件功能器件和软件指令系统为基础的。我们还必须确保各基本运算的正确时间顺序和同步关系。值得注意的是，元件技术的发展水平对于专用硬件或通用计算机有着决定性的影响，对于数字信号处理结构也有着很大的影响。在过去二、三十年内，元件技术已从单个逻辑门元件发展到能够进行高速乘法运算和加法运算的单个元件，甚至出现了完整的进行信号处理的单片处理器的商品。而且，元件性能的提高相当快，而元件价格的增长相对来说是微不足道的。这就极大地促进了数字信号处理的理论和技术在更加广泛的范围内获得应用。因此，无论从应用领域还是从所涉及到的理论和技术来看，数字信号处理的学科范围都是十分广泛的。

数字信号处理的基本运算

前已指出，各应用领域中提出的各类数字信号处理问题，都要用适当的理论模型来表示。这些模型一般都归结为一组相互联系的基本运算。数字信号处理中常用的几种基本运算如下：

(1) 差分方程计算

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

该方程表示递归或无限冲激响应数字滤波运算的总的计算要求。式中 $x(n)$ 是输入序列， $y(n)$ 是滤波后的输出序列。参数 M 、 N 、 a_k 、 b_k 确定了滤波器的特性。当系数 b_k 等于零时，上述差分方程简化为有限卷积和的计算，即

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

该式表示非递归或有限冲激响应数字滤波运算，式中系数 a_i 就是滤波器的单位取样响应。

(2) 相关系数的计算

相关运算是另一种常用的运算，定义为

$$\Phi(m) = \sum_{n=-N}^N y^*(n)x(n+m)$$

这里，求和区间 $-N$ 至 N 表示两个信号进行相关运算的窗， $y^*(n)$ 是 $y(n)$ 的复共轭。

(3) 离散傅里叶变换计算

数字信号处理中应用得最广泛的运算之一是离散傅里叶变换计算，用以下变换对表示：

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi}{N}kn}, \quad k=0,1,\dots,N-1$$

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} X(k)e^{j\frac{2\pi}{N}kn}, \quad n=0,1,\dots,N-1$$

这两个式子常用快速傅里叶变换(FFT)方法来计算。FFT是以蝶形运算为基础的，即

$$X(k) = A \pm BW_N^k$$

这里， A 和 B 通常是复数， $W_N^k = e^{j\frac{2\pi}{N}k}$

(4) 功率谱密度或振幅平方的计算

复数的振幅求平方的运算是功率谱估计中常用的一种运算，定义为

$$|X(k)|^2 = X(k) \cdot X^*(k)$$

(5) 矩阵运算或矩阵变换

在数字信号处理中，很多计算公式用矩阵和矢量形式来表示是很简明的。这样，就必须用到矩阵和矢量的一些基本运算以及矩阵中的一些变换运算，如矩阵和矢量的加法、乘法、乘以标量、矩阵转置、求逆矩阵、求复共轭以及Hermitian转置等。

(6) 对数和指数运算

在同态信号处理中, 对数和指数运算是两种基本运算。

(7) 复频率变换

可以用复数乘法运算将数字信号 $x(n)$ 变换到不同频段上去

$$y(n) = x(n)e^{j2\pi kn}$$

式中参数 k 表示变换频率与输入信号 $x(n)$ 的取样频率的比值。

(8) 模数转换和数模转换

对模拟信号进行数字处理时, 这是两种基本的运算, 如图02所示。

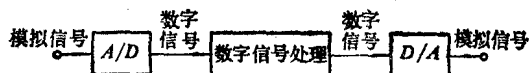


图02 模拟信号的数字处理

任何数字信号处理问题, 都可以用以上的还有其它的基本运算, 经过适当的组合后来实现。

数字信号处理的应用领域

(1) 语音处理

这是最早应用数字信号处理技术的领域之一, 也是最早推动数字信号处理理论向前发展的领域之一。该领域有两个主要问题。第一, 对人类语音信号进行分析。主要涉及到自动语音识别、说话者的辨识或确认、为了有效传输和存储语音信号而研究语音波形的参数表示(包括编码和压缩)。第二是语音合成。这方面已经取得很大进展。目前国外已有用于各种不同目的的语音合成系统的商品, 如盲人自动阅读机、发音器官有生理缺陷的人所用的语音合成器、计算机的语音应答终端、以及各种会说话的玩具和仪表等等。

(2) 图象处理

一个数字图象信号代表着数量级达上百万个的取样值。这就

要求高性能、高速度的处理器和存贮器，因而集成电路工艺技术的最新成就对数字图象处理的发展有很大的促进作用。数字信号处理技术现已成功地应用于图象恢复和增强、数据压缩、去图象污染以及层析X射线摄影、雷达、声纳、超声及红外信号的可见图象成象。

(3) 通信

在通信领域内，现在几乎没有一个分支不受到数字信号处理技术的某种影响。数字技术现已被应用于信号调制、多路复用、编码以及数据率压缩。在远距离通信领域内，数字处理技术已被用于音调检测、去回声以及数字交换网络。音频段通信信号的许多处理功能现在已经能够用单个集成电路元件来实现。

(4) 雷达

雷达信号占据着很宽的频带，数据率很高。为了有效地应用数字信号处理技术，首先必须解决压缩数据量和数据率的问题。高速数字器件的出现促进了雷达信号数字处理的研究，也促进了高性能数字信号处理技术本身的发展，并使之成为当今高度活跃的一个研究领域。现代的雷达系统，已成功地应用了许多种数字信号处理技术，其中涉及到信号的产生、匹配滤波、门限比较以及目标参数的估计等。

(5) 声纳

声纳信号处理可分成两大类，即有源声纳和无源声纳的信号处理。有源声纳系统的许多概念与雷达系统相同，例如它们都要产生和发射信号脉冲；它们的信号处理的主要任务都是回波的检测和分析，以便对目标进行探测、定位、导航和图象显示；它们所用到的主要信号处理技术是匹配滤波、门限比较等。无源声纳系统不同于有源声纳系统的地方在于，它不产生和发射声频信号，而只是简单地“倾听”周围的声音；它的主要处理功能是在高分辨率的谱分析和超声波振子阵列处理。

(6) 地球物理学

这是应用数字信号处理技术已有相当长历史的一个领域。该领域中信号处理的主要问题涉及到地震信号分析，建立描述地球内部结构和性质的模型，这有助于石油勘探方面的应用。另一个信号处理问题是研究地震和火山的活动规律。此外，近年来，数字信号处理技术还被用于地球上空大气层反射回来的无线电波的分析研究，以确定大气的性质（如电子的含量等）。

（7）生物医学信号处理

数字信号处理技术在医学中的应用日益广泛，如脑电图和心电图分析、计算机辅助层析X射线摄影等。

（8）音乐处理

将数字信号处理用于音乐，包括：将多种音乐信号加以编辑、混合，成为一个单独的表演；加入一些特殊的效果（如交混回响、合唱等）使音乐效果加强。数字技术还被用于作曲、合成，音乐的录音和播放，以及旧唱片的恢复。

除上面所列举的领域外，最近还报道了一些新的应用领域。如能源分布规划，对空气污染进行环境研究以及噪声干扰的检测等。这里所列举的尚未包括军事上的许多应用，而军事上的应用是大量的、多方面的，例如导航、制导、电子对抗以及磁异常检测等。

数字信号处理学科的历史

从某种意义上来讲，数字信号处理是计算机的许多算法的汇集，因此可以认为它只不过是计算数学的一个分支，而计算数学主要是在17世纪至18世纪中叶发展起来的。但作为一门现代的新兴学科，数字信号处理却只经历了二、三十年的历史。

现代意义上的数字信号处理，是在本世纪40年代和50年代才开始形成独立的学科体系的。这一时期，建立了取样数据系统理论，主要用于取样数据低频控制系统的分析和设计。但从本质上

讲，取样数据系统理论只不过是线性连续系统理论的推广。

50年代末期至60年代初期，开始利用数字计算机对信号进行数字处理和研究。例如，用数字相关方法处理地震信号和大气数据，用数字方法模拟声码器，以及数字功率谱分析技术等。这些属于初期的数字信号处理系统，都是用软件来实现的，占用了相当多的计算机时间和资源，而且一般都不能做到实时处理。

数字信号处理技术的迅速发展是从60年代中期开始的。其主要标志是出现了两项重大进展，即快速傅里叶变换 (FFT) 算法的提出和数字滤波器设计方法的研究。

早在1960年，I.J.Good就提出过用稀疏矩阵变换来计算离散傅里叶变换的方法。实际上这应该是计算离散傅里叶变换的第一个快速算法。遗憾的是，由于当时的计算机资源很有限，一般人都 unwilling 用宝贵的计算机资源去实践Good提出的算法。五年以后，即1965年，当世界经济繁荣起来而计算机资源变得稍有余裕的时候，J.W.Cooley和J.W.Tukey提出的快速傅里叶变换 (FFT) 算法才应运而生，并很快得到推广应用。其实这种算法与Good的思想是类似的。FFT算法的出现是数字信号处理领域中一项重大突破。FFT之所以重要，主要是因为：第一，它的计算速度快，它把离散傅里叶变换的计算速度提高了两个数量级，使许多信号的数字处理成为可以实现的。当时所有其它算法都无法达到这样高的计算速度；第二，这种算法对计算机的存储器的利用率高；第三，这也许是最重要的一点，它开创了真正地进行数字处理的新时代，它是真正地将数字信号而不是取样数据信号进行处理，它考虑了实际的数字计算机的一些约束条件。从此以后，凡是研究数字信号处理的人，都毫无例外地必须对数字机（包括通用数字计算机和各种数字系统硬件）的结构进行深入的了解。FFT不仅是一种快速计算方法，而且它的出现还有助于启发人们创造新理论和发展新的设计思想。在FFT提出来以后，经典线性系统理论中的许多概念，例如卷积、相关、功率

谱、转移函数等，都在离散傅里叶变换的意义上重新加以定义和解释。同时，FFT的出现还引导人们开始去研究有限字长效应、数字结构以及数字算术等许多重要问题。

数字信号处理学科的另一项重大进展是关于数字滤波器设计方法的研究。关于数字滤波器，早在40年代末期，就有人讨论过它的可能性问题，在50年代也有人在研究生班讨论过数字滤波的问题。但直到60年代中期，才开始形成关于数字滤波器的一整套完整的正规的理论。在这一时期，提出了各种各样的数字滤波器结构，有的以运算误差最小为特点，有的则以运算速度高见长，而有的则二者兼而有之；出现了数字滤波器的各种逼近方法和实现方法，对递归和非递归两类滤波器作了全面的比较，统一了数字滤波器的基本概念和理论。有限冲激响应（FIR）和无限冲激响应（IIR）数字滤波器两者地位的相对变化的过程，在数字信号处理学科发展过程中，是一件颇令人感到兴趣的事。起初，人们用窗孔函数分析FIR滤波器，得出结论说，IIR滤波器比FIR滤波器的运算效率更高。但当人们提出用FFT方法实现卷积运算的概念之后，发现高阶FIR滤波器也可以用很高的运算效率来实现，这就促使人们对高效能FIR滤波器的设计方法和数字滤波器的频域设计方法进行了大量的研究，从而出现了此后数字滤波器设计中频域方法和时域方法并驾齐驱的局面。然而，这些均属数字滤波器的早期研究，而且一般都是用软件来实现的，早期的数字滤波器尽管在语音、声纳、地震和医学的信号处理中曾经发挥过作用，但由于当时计算机主机的价格很昂贵，因而严重阻碍了专用数字滤波器的发展。如果数字信号处理系统只局限于用软件实现，那么其应用范围必然受到很大限制。

70年代科学技术的蓬勃发展，为数字信号处理学科的前进开辟了道路。数字信号处理开始与大规模和超大规模集成电路技术、微处理器技术、高速数字算术单元、双极型高密度半导体存储器、电荷转移器件等新技术、新工艺结合了起来，并且引进了