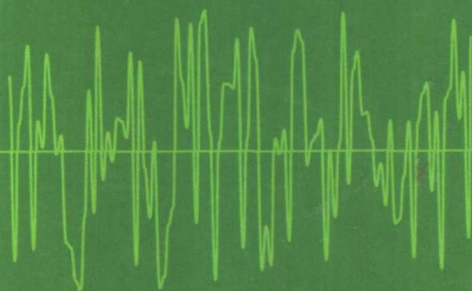



数字信号处理参考教材系列

数字信号处理 基础理论

〔日〕谷萩隆嗣 著



 科学出版社
www.sciencep.com

数字信号处理参考教材系列

数字信号处理 基础理论

〔日〕谷萩隆嗣 著
薛培鼎 徐国甯 译

科学出版社
北京

图字:01-2003-1058 号

Digital Signal Processing and Basic Theory

Copyright © 1996 by Takashi Yahagi & Corona Publishing Co., Ltd.

All rights reserved.

Chinese translation rights arranged with Corona Publishing Co., Ltd.

Tokyo, Japan.

デジタル信号処理ライブラリー1

デジタル信号処理と基礎理論

Digital Signal Processing and Basic Theory

谷萩隆嗣 株式会社コロナ社

Takashi Yahagi CORONA PUBLISHING CO., LTD.

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理基础理论/(日)谷萩隆嗣著;薛培鼎,徐国菊译.

—北京:科学出版社,2003

(数字信号处理参考教材系列)

ISBN 7-03-011369-1

I. 数… II. ①谷… ②薛… ③徐… III. 数字信号-信号处理
IV. TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 031496 号

责任编辑 崔炳哲 **责任制作** 魏 谨

责任印制 刘士平 **封面设计** 李 力

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

保海印刷有限责任公司 印刷

北京东方科龙图文有限公司 制作

<http://www.okbook.com.cn>

科学出版社发行 各地新华书店经销

2003年9月第 一 版 开本:A5(890×1240)

2003年9月第一次印刷 印张:9 1/8

印数:1—4 000 字数:197 000

定 价: 23.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈新欣〉)

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 数字信号处理的目的	2
1.2 数字信号处理的应用	3
1.3 数字信号处理的形态	6
1.4 数字信号处理的发展	7
第 2 章 数字信号处理的数学基础	11
2.1 拉普拉斯变换与傅里叶变换	12
2.1.1 拉普拉斯变换与拉普拉斯反变换	12
2.1.2 拉普拉斯变换的性质	17
2.1.3 傅里叶变换与傅里叶反变换	19
2.1.4 傅里叶变换的性质	20
2.1.5 傅里叶级数与正交函数系	21
2.2 z 变换与采样过程	23
2.2.1 差分方程与 z 变换	23
2.2.2 拉普拉斯变换与采样定理	24
2.2.3 拉普拉斯变换与 z 变换	33
2.2.4 z 反变换	34
2.2.5 z 变换的性质	36
2.2.6 单位冲激响应与 z 变换	38
2.2.7 傅里叶变换与 z 变换	39
2.2.8 傅里叶变换与采样定理	41
2.3 DFT 与 FFT	42
2.3.1 DFT 的定义	42

2.3.2	DFT 的性质	43
2.3.3	窗函数	46
2.3.4	FFT 的概念	50
2.3.5	FFT 的算法	51
2.4	矩阵与线性方程	56
2.4.1	线性独立与阶数	56
2.4.2	二次型与正定矩阵	57
2.4.3	标准型与对角化	58
2.4.4	向量和矩阵的微分	59
2.4.5	逆矩阵和行列式定理	61
2.4.6	最小二乘解与最小范数解	63
2.4.7	特殊联立一次方程的数值解法	64
2.4.8	线性向量微分方程的解法	66
第 3 章	数字信号处理中的系统理论	69
3.1	线性动态系统的基础知识	70
3.1.1	线性系统与非线性系统	70
3.1.2	连续时间系统与离散时间系统	72
3.1.3	定常系统与非定常系统	73
3.2	线性动态系统的数学模型	74
3.2.1	连续时间系统的传递函数模型	74
3.2.2	离散时间系统的传递函数模型	78
3.2.3	连续时间系统的状态变量模型	80
3.2.4	离散时间系统的状态变量模型	83
3.2.5	从状态变量模型转换为传递函数模型	84
3.2.6	从传递函数模型转换为状态变量模型	87
3.2.7	数学模型的方框图表示	89
3.3	线性离散时间系统分析	91



- 3.3.1 线性离散时间系统分析 91
- 3.3.2 线性采样数据系统的状态空间法分析 91
- 3.3.3 线性采样数据系统的z变换法分析 92
- 3.3.4 用采样数据系统近似连续时间系统 96
- 3.4 线性动态系统的结构 98
 - 3.4.1 线性动态系统的可控制性 98
 - 3.4.2 线性动态系统的可观测性 103
 - 3.4.3 线性动态系统的零极点抵消 106
 - 3.4.4 线性动态系统的标准型 115
- 3.5 线性动态系统的稳定性 119
 - 3.5.1 连续时间系统传递函数的稳定性 119
 - 3.5.2 离散时间系统传递函数的稳定性 123
 - 3.5.3 连续时间系统状态方程的稳定性 125
 - 3.5.4 离散时间系统状态方程的稳定性 132

第4章 数字滤波器基础 135

- 4.1 模拟滤波器的频率特性 136
 - 4.1.1 模拟电路的振幅特性与相位特性 136
 - 4.1.2 模拟滤波器的种类 140
 - 4.1.3 巴特沃思滤波器 141
 - 4.1.4 切比雪夫滤波器 145
- 4.2 数字滤波器的分类 147
 - 4.2.1 用数字滤波器进行信号处理的过程 148
 - 4.2.2 数字滤波器的分类 149
- 4.3 数字滤波器的频率特性 150
 - 4.3.1 振幅特性 150
 - 4.3.2 相位特性 152
- 4.4 数字滤波器的结构及误差分析 153

4.4.1	数字滤波器的结构	154
4.4.2	数字滤波器的误差分析	156
4.5	FIR 数字滤波器的设计	157
4.5.1	窗函数法设计	157
4.5.2	线性相位滤波器的优化设计	159
4.6	IIR 数字滤波器的设计	163
4.6.1	s - z 变换法设计	163
4.6.2	近似线性相位滤波器的优化设计	164
第 5 章	数字语音信号处理	169
5.1	语音形成过程的模型	170
5.1.1	语音的特征和分类	170
5.1.2	语音形成的模型	173
5.1.3	声道的传递函数模型	175
5.2	线性预测分析方式	178
5.2.1	全极点型模型	178
5.2.2	辅音的全极点型模型	180
5.2.3	元音的全极点型模型	181
5.2.4	模型的增益	182
5.3	PARCOR 方式	183
5.3.1	PARCOR 方式的基本概念	183
5.3.2	计算 PARCOR 系数的算法	184
5.3.3	PARCOR 方式的格型滤波器实现	186
5.4	倒谱方式	189
5.4.1	倒谱的概念	189
5.4.2	倒谱的性质	190

第 6 章 数字图像处理基础	197
6.1 图像的采样和量化	198
6.1.1 图像的采样	198
6.1.2 图像的量化	203
6.2 图像的数学模型	206
6.2.1 图像数学模型的种类	206
6.2.2 图像数学模型的辨识	207
6.3 二维 DFT	209
6.3.1 二维 DFT 的定义	209
6.3.2 二维 DFT 的性质	210
6.4 数字图像增强	212
6.4.1 用灰度变换进行对比度增强	212
6.4.2 用直方图修正进行对比度增强	216
6.4.3 用微分操作进行图像锐化	222
6.4.4 图像的平滑	224
6.5 数字图像复元	227
6.5.1 点扩展函数	228
6.5.2 图像的恶化过程	229
6.5.3 恶化图像的复元过程	231
6.5.4 二维数字滤波器	232
6.5.5 用二维 FIR 滤波器进行图像复元	234
6.6 数字图像压缩	235
6.6.1 变换编码方式	235
6.6.2 预测编码方式	241
数字信号处理有关文献	245
参考文献	257
索引	265

第1章

绪论



- 1.1 数字信号处理的目的
- 1.2 数字信号处理的应用
- 1.3 数字信号处理的形态
- 1.4 数字信号处理的发展

随着数字技术的飞速发展,数字信号处理已成为许多领域中不可缺少的手段。本章首先说明数字信号处理的目和数字信号处理在各个领域中的应用状况,然后简单叙述数字信号处理的形态,数字信号处理的发展过程,以及对今后的展望。

1.1 数字信号处理的目的

信号处理由于受到必要的运算速度、处理系统的规模、成本等各种因素的制约,以前都是用模拟技术实现的。而现在,许多本来是用模拟技术实现的处理,都已经采用数字处理了。实际的数字信号处理(digital signal processing)是用各种计算机、数字信号处理器(DSP: Digital Signal Processor)或其他专用处理器来实现的,随着这些设备和器件在快速化、高性能化、大容量化、小型化、廉价化等方面的飞跃性发展,相当复杂的高级信号处理也已能够实现。也就是说,利用数字信号处理能够实现模拟信号处理(analog signal processing)所不能达到的复杂处理和高级处理,例如在多媒体的动态图像处理中,图像压缩、移动补偿、编码、解码等许多环节都是用数字信号处理来快速进行的。可以不夸张地说,正是由于数字信号处理实现了这些处理的实时性,多媒体才真正体现了它现实的魅力。

对于用模拟信号处理所不能实现或用模拟信号处理达不到精度要求的那些问题,一般都寄希望于用数字信号处理来解决,因而,数字信号处理技术的应用范围有不断扩大的趋势,并且,许多领域今后还会提出更高的技术要求。从这种形势来看,数字信号处理的必要性和重要性还将继续增强。

1.2 数字信号处理的应用

数字信号处理是个很宽的学术领域,它的应用并不仅限于工程领域的窄范围,而已经被图 1.1 所示的众多学术领域所采用。

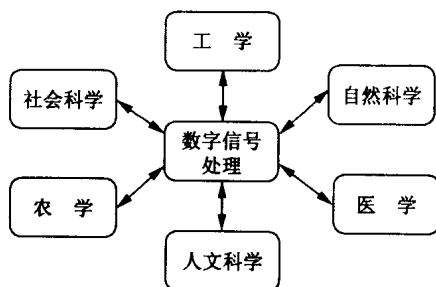


图 1.1 数字信号处理与学术领域

在天文学领域中,很早就进行了太阳黑子的时间序列分析,我们知道,那是利用 AR 模型(Autoregressive Model,自回归模型)所进行的分析^[1]。而在以射电天文学为代表的现代天文学方面,为了从观测数据获得可靠的信息,已经采用了高级数字信号处理的技术。

在地震学领域中,早就知道利用相当于 AR 模型等线性模型的方法来进行地震波分析和特征提取,其中最著名的就是最大熵法(MEM; Maximum Entropy Method)^[2]。在石油等地下资源勘探及古代遗迹勘察方面,也采用着各种各样的数字信号处理手段。计量经济学(econometrics)中则是利用最小二乘法(least-squares method)及各种方法构成的线性模型来进行经济预测的^[3]。

在医学领域中,稍微留意一下最近的发展状况就能发现,现在几乎没有不用计算机的医学了。例如,临床医学上已广泛流行着利用多种医学图像来进行病情诊断的图像诊断方法,这是因为以超声图像和 CT(Computed Tomography,计算机辅助断层扫描机)图像为首的医

学图像在现场诊断方面已经实用化了,它也是数字图像处理带给医学领域的巨大变化。此外,数字信号处理还在脑电波和心电图等生体信号分析中扮演着重要的角色。

在生物学中的生物统计(biometrics)领域中,通过各种生物学信号的数字处理来进行AR模型和ARMA模型(auto regressive moving average model,自回归移动平均模型)等模型化,农学领域通过计算机控制来培育作物,利用遥感(remote sensing)信息来进行生物发育状况的估计和预测等,这些都是数字信号处理技术的重要应用。

环境科学中可以通过对各种环境数据的观测和数字处理来预测污染程度;气象学中的预报问题可以通过对地面上所观测到的气象数据或遥感观测数据进行数字化处理来大幅度提高预报的准确性。此外,在以生物与环境的关系为主要对象的生态学(ecology)中,也可以通过引入各种线性模型或非线性模型来对信号进行数字化处理。

与上述学科领域距离很大的心理学和认知科学等人文科学领域中也进行着多种时间序列数据的数字化处理。不仅与人机接口或模式识别有关的语音和图像等内容必须进行数字化处理,而且,本来属于艺术领域的语言和音乐等问题,也能用数字信号处理技术来进行,例如借助于数字信号处理技术来用计算机进行歌曲分析和作曲等。可见,在范围极宽的各领域中都有计算机在发挥着作用,它们不仅被用于简单的数据分析,而且被用于各种目的的数字信号处理。

下面,我们把话题局限于工程领域,用图1.2和图1.3示出数字信号处理的相关领域。

图1.2示出了与数字信号处理有关的主要工程领域。除此以外,还有许多领域与数字信号处理也有关系。例如,就语音和音响信号处理而言,建筑音响与建筑学有关;噪声控制与机械工程及航空工程等有关;海洋音响不但与音响工程有关,而且与海洋工程有很大关系。而在石油等地下资源勘探中,音响信号处理也是资源工程方面的重要课题。为了使数字信号处理获得良好的结果,如何获取噪声小的优质

观测数据是个最基本的问题,为此就需要选择合适的传感器,这样,优质传感器的开发也就成了测量科学和材料科学方面的重要课题。

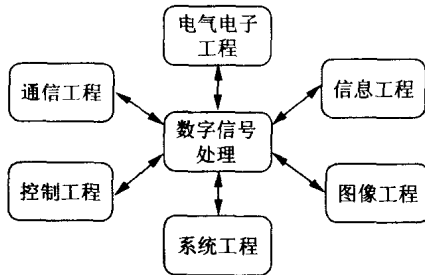


图 1.2 与数字信号处理有关的主要工程领域

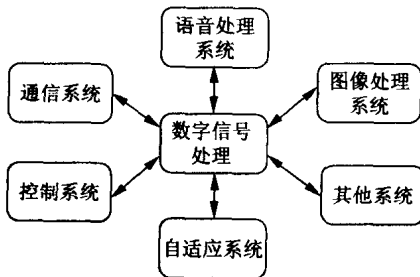


图 1.3 主要的数字信号处理系统

图 1.3 所示为工程领域中进行数字信号处理的一些主要系统。数字信号处理的典型内容是数字滤波器(digital filter),它在图 1.3 所列举的许多信号处理系统中都有所应用,而自适应系统(adaptive system)中则要用到多种自适应数字滤波器(adaptive digital filter)。

可见,数字信号处理已经在许多领域中得到了应用,并且其应用领域还在不断扩大。

1.3 数字信号处理的形态

以语音信号为例,作为数字信号处理对象的信号本来大都是模拟信号。为此,要先对模拟信号进行 A-D 转换,使之成为数字信号,然后才能进行数字信号处理,处理之后再经过 D-A 转换变回模拟量信号。由于信号中常常含有高频噪声,如果直接对输入信号进行 A-D 转换,就会对后面进行数字处理带来一些不良影响,因而通常都在采样之前加上一个适当的低通滤波器。此外,对于 D-A 转换后的信号,为了使波形光滑一些,通常也要加一个低通滤波器。

对于数字通信等传输途中的信号,它们已经是数字信号,即中间信号处理装置的输入输出都是数字量,所以不必再用 A-D 和 D-A 转换器。数字信号处理装置中不带 A-D 和 D-A 转换器的例子很多,这种情况下,作为处理对象的信号本身已经是数字量。

一般来说,数字信号处理装置是指直接对已经是数字量的信号进行处理的装置。

要进行数字信号处理,就需要有以计算机为代表的数字信号处理装置的硬件和驱动硬件的软件,再考虑到包括理论和应用技术在内的数字信号处理技术,便可得到如图 1.4 所示的关系图。

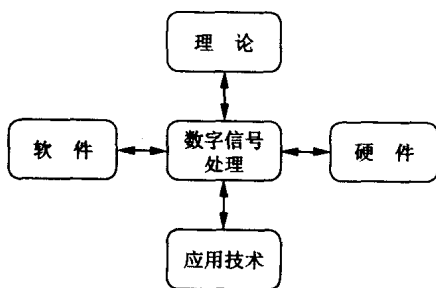


图 1.4 数字信号处理技术示意图

也就是说,要使数字信号处理技术实际发挥作用,需要有相应的硬件和软件装置、信号处理理论及信号处理的应用技术。只有把这些条件有机地结合起来,才能使数字信号处理本来的功能发挥出来。

1.4 数字信号处理的发展

如果从工程的角度来回顾数字信号处理的发展过程,可以发现其起点之一是 20 世纪 50 年代的采样值控制^[4~6]。20 世纪 50 年代,数字技术还处在非常薄弱的时期。那时候,一种利用离散时间点上所观测到的输出信号来进行控制的崭新想法被提出来,并因此而导出了各种令人感兴趣的结果。例如,在有限整定响应中,希望控制效果能达到阶跃响应在有限时间内不发生上下摆动而与目标值准确一致,对于这一长期得不到解决的问题,根据采样值控制的思想首次显示了解决的可能性^[4]。用模拟处理不能实现而用数字处理有可能实现这一结论的明朗化,使人们对数字处理寄予了很大希望。数字信号处理中广为使用的数学工具是 z 变换,它也是古典采样值控制理论中所用的数学工具,其理论体系也于 50 年代末完成。

另一个重要方面与通信理论的发展有关。早在 1937 年, A. H. Reeves 就发明了 PCM(Pulse Code Modulation, 脉冲编码调制)通信方式。虽然 PCM 通信现在已经是非常大众化的工具了,但在当时,实现这一通信方式所要求的快速处理尚无可能,于是便长期被搁置了下来。到了 20 世纪 60 年代,由于半导体技术的迅速发展,PCM 通信才得以实用化。美国于 1962 年开始用 T1 方式进行 PCM 通信,日本是在 1965 年开始的,采用的是 24 路近距离 PCM 通信方式 PCM-24。早期的 PCM 通信虽然没有怎么使用数字技术,但在用通信线路传送给过编码而形成的数字信号这点上却是具有划时代意义的。此后,随着数字技术的发展,通信领域中也进行了数字信号处理,数字均衡器(digital equalizer)就是一个典型代表。R. W. Lucky 的自动均衡器

(automatic equalizer)^[7]和自适应均衡器(adaptive equalizer)^[8]是数字均衡器的早期重要成果,分别发表于1965年和1966年。现在的数字通信(digital communication)中,大量使用着以数字均衡器为首的数字设备。

信号理论的发展与通信理论有着密切的关系。古典信号理论可说是由维纳(N. Wiener)确立的。维纳所提出的最优滤波器称为维纳滤波器(Wiener filter)^[9],它是一种能使估计值或预测值的均方误差达到最小值的最优滤波器,是利用傅里叶变换在频域中设计成的适用于模拟处理的滤波器。从利用了傅里叶变换这点上可知,维纳滤波器本来就是以平稳随机过程为前提的滤波器。

维纳以提出控制论(cybernetics)^[10]而著名,而控制论的概念已扩展到现代医疗电子工程、人机工程、通信工程、控制工程等广阔领域,自适应系统、学习系统、智能系统等也都可以认为是以控制论的概念为基础而发展起来的。近年来,人们对于神经网络(neural network)和模糊系统(fuzzy system)的研究很兴盛,它们的应用领域很宽,这些概念也可以认为是控制论的延伸。从数字信号处理的角度来看,它们都是非常重要的。今后,神经网络信号处理和模糊信号处理的应用将会进一步增加。

在维纳之后,对维纳滤波器的扩展有过各种尝试,但只限于在频域中进行研究,几乎没有什么进展。卡尔曼(R. E. Kalman)对维纳滤波器进行了基于时域定式化的根本变革。卡尔曼所提出的最优滤波器称为卡尔曼滤波器(Kalman filter),它有适用于离散时间系统的离散型滤波器和适用于连续时间系统的连续型滤波器两种类型^[11~13]。数字信号处理中使用离散型卡尔曼滤波器。卡尔曼滤波器广泛应用于自适应信号处理(adaptive signal processing)及其他广阔领域。

能去除信号中所含的高频分量,或者只让某一频带内的信号分量通过的特性,称为频率选择性。进入20世纪60年代以后,人们对曾经用具有频率选择性的经典模拟滤波器进行模拟处理的关心很快便

转移到了数字处理上。具有频率选择性的滤波器至今仍有着广泛的应用,1965年前后,由于滤波器采用了数字技术,于是便有了数字滤波器的叫法^[14,15]。数字滤波器在现代数字信号处理中是不可缺少的重要技术。

为了使数字信号处理广泛应用于实际,还需要能通过快速处理来实现实时处理。J. W. Cooley 和 J. W. Tukey 于 1965 年所发表的快速傅里叶变换(FFT:Fast Fourier Transform)^[16]是早期快速算法的代表性算法。人们早就知道,傅里叶变换和傅里叶级数是频域分析和设计的有用数学工具,但用它来进行数字信号处理需要花费庞大的计算量和计算时间,因此实用上有很多困难。采用 Cooley 和 Tukey 的算法能显著减少计算量,例如乘法次数和加法次数分别可减少到 1/200 和 1/100 的程度。由此便一举开创了用算法来进行数字信号处理的可能性。在这一点上,快速傅里叶变换的理论是具有划时代意义的。现在,人们不仅知道了各种快速算法,并且还制成了许多用于实时处理的专用硬件。

这样,由于非常多的领域需要采用数字信号处理技术,而图 1.4 所示的各部分之间又在相互激励之中得到了发展,于是促使数字信号处理取得了全面飞跃性的进步。今后,这种趋势仍会继续下去。在工程领域中,图 1.5 所示的种种系统已经进入我们的视野,这就需要确立更高级的数字信号处理体系。

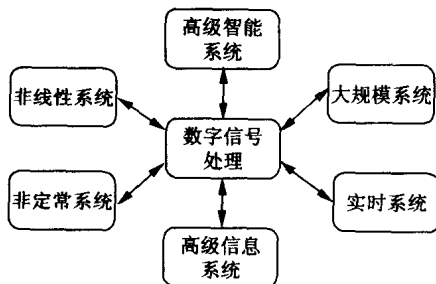


图 1.5 数字信号处理的发展动向