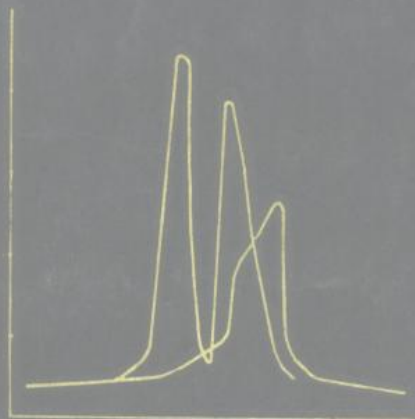


一维数字信号处理

CHI-TSONG CHEN 著 杜声孚 谢柏青 译



One - Dimensional
Digital Signal
Processing

高等教育出版社

一维数字信号处理

CHI-TSONG CHEN

陈启宗 著

杜声孚 谢柏青 译

高等教育出版社

内 容 提 要

本书系根据美国 MARCEL DEKKER 出版社1979年出版的
One-dimensional Digital Signal Processing 一书, 由北京大
无线电系杜声孚、谢柏青同志译出。

全书十三章分为三个部分, 主要讲述数字信号处理的基本原理和
方法。介绍了模拟信号和数字信号的基本概念及其频域分析方法;
IIR 和 FIR 数字滤波器的基本设计方法和各种实现方案; 数字处理
的误差分析; 随机信号的谱测量和最佳滤波器等内容。各章附有复习
题和习题。书末附有附录。

本书可供高等院校电子工程、计算机科学系的学生和教师做为教
学用书, 也可供从事数字信号处理方面工作的科技人员参考。

责任编辑 尹 洪

一维数字信号处理

CHI-TSONG CHEN 著

陈启宗 著

杜声孚 谢柏青 译

*

高等教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

河北省香河县印刷厂印装

*

开本 850×1168 1/32 印张 14 字数 340 000

1987年10月第1版 1987年10月第1次印刷

印数 00 001—3,150

书号13010·01191 定价3.20 元

译者前言

数字信号处理是信息科学中的一门重要学科。由于计算机技术、大规模及超大规模集成电路的迅速发展,使用数字电子计算机和专用的数字信号处理机进行信号分析与处理已非常普遍。数字信号处理技术具有速度快、精度高、稳定性好、处理手段丰富和灵活等优点。当前它已在通信、雷达、声纳、图象处理、语言分析与合成、振动、地球物理及生物医学工程等科学领域中有着广泛的应用。

与此同时,数字信号处理也已成为信息科学专业教学中的一门重要课程。虽然目前已有了一批数字信号处理的专著,但比较适合于作大学教材的还不够多。从教学的角度看,本书选材广度和深度适中,着重概念分析,说理清楚,有较多的复习思考题和习题,还有不少联系实际问题的例子,很适合于初学或自学,是学习数字信号处理的较好的入门书。为此,我们将本书译出,希望有助于我国数字信号处理学科在教学及研究工作方面的开展。

原书印刷中有相当的错、漏之处,虽经译者尽力校正,限于我们的水平,难免有误,切望读者批评指正。

译者

1984年10月于北京大学无线电系

前 言

本书是为数字信号处理的初级课程提供的教材，它是作者在过去六年的教学实践中逐步形成的。起初用于研究生课，后来又用于高年级大学生课，在为搞实际工作的工程师们开的校外课程中亦使用过，这些人当中有生物工程师、计算机科学家、地球物理学家和机械工程师，但大部分是电气工程师。

这本书所用的数学基础是大学水平的微积分，没有用到多少模拟系统理论的知识。本书侧重数字技术，所引用的模拟系统理论只是为使数字技术的讨论更加完善，这种写法可能更符合希望较快掌握数字技术的读者的要求。这样安排还有利于教学，因为在数字技术中所需要的数学知识比在模拟技术中的简单。

本书分为三个主要部分：数字谱分析，数字滤波器的设计和统计方法。第一部分中，先引入模拟和数字信号的谱的概念，然后讨论取样频率的选择以及与模拟信号和数字信号之间转换有关的问题。在讨论快速傅里叶变换(FFT)时，本书侧重于它的应用而不是强调其各种形式。这里我们考虑利用快速傅里叶变换计算信号的谱、由谱计算时域信号以及计算周期函数的傅里叶级数等。在第二部分中，本书逐步阐述了线性、时不变、因果的数字滤波器并讨论了在其设计中所遇到的问题，然后介绍FIR和IIR滤波器的设计。这些讨论并不追求完美无缺，只是介绍基础和基本的设计方法。在第二部分的最后一章，是讨论数字滤波器的各种实现方案，比较它们的相对优劣，并研究了有限字长所带来的问题。在第三部分中我们介绍了统计方法。在第十章介绍了随机过程的基本概念和结论之后，接下的几章讨论了三个独立的课

题：误差分析、随机信号的谱测量和有最小均方误差的最佳滤波器的设计，学习这三章时可以变换次序。

本书可作为高年级大学生或研究生的数字信号处理课程的教材。用于大学生的课程时，通常可只用本书的第一和第二部分，而且只讨论单边 z 变换。如果学生的数学基础较差，还可删去收敛域的讨论。在研究生的课程中，可以多教两章，一般取第十章和第十三章。当然也可以取其它的组合。

为读者着想是本书写作的特点。在介绍每个概念和每种设计方法后均附有例题。每一章后都备有大量复习题和习题。并出版了题解手册。

本书曾根据学这门课程学生的反应作过若干次重要修改，特向这些学生致谢。K.K.Wong 用快速傅里叶变换演算了所有数值计算的实例；P. Raman 和 R. Sood 准备了题解手册；S.J.Tasi 校对了最后原稿；Y.C.Jenq 教授准备了附录，特此向他们致谢。T.Marasco, V. Donahue 和 S.Rudnick 打印了本书的各次草稿，一并在表示谢意。

陈启宗 (Chi-Tsong Chen)

目 录

第一部分 数字谱分析

第一章 概论	1
1-1 时域连续信号、时域离散信号和数字信号	1
1-2 数字信号的表示法	4
1-3 数字技术和模拟技术的比较	6
1-4 A/D和D/A变换	7
1-5 数字信号处理的应用	10
1-6 要点和复习题	12
习题	12
第二章 傅里叶变换和 z 变换	14
2-1 傅里叶级数	14
2-2 傅里叶变换	19
2-3 冲激函数	23
2-4 z 变换	27
2-5 z 变换的性质	36
2-6 z 反变换	40
2-7 卷积	51
2-8 要点和复习题	59
习题	60
第三章 模拟和数字信号的转换	65
3-1 时域连续信号及其取样序列的谱	65
3-2 信号的恢复	71
3-3 模拟信号的预滤波	73
3-4 取样频率的选择	76

3-5	要点和复习题	78
	习题	78
第四章	离散傅里叶变换、快速傅里叶变换以及谱的计算	81
4-1	引言	81
4-2	离散傅里叶变换(DFT)	84
4-3	快速傅里叶变换(FFT)	89
4-4	FFT的实现	95
4-5	谱的计算: 有限序列情况	100
4-6	谱的计算: 无限序列情况	105
4-7	谱的计算: 时域连续信号情况	115
4-8	由谱计算傅里叶级数和时间序列	119
4-9	要点和复习题	130
	习题	132

第二部分 数字滤波器

第五章	线性时不变数字滤波器	135
5-1	线性、时不变性和因果性	135
5-2	离散卷积	137
5-3	传递函数	140
5-4	差分方程	143
5-5	数字滤波器的响应	147
5-6	数字滤波器的稳定性	150
5-7	稳定的滤波器的稳态响应	155
5-8	绘制幅度和相位特性曲线	158
5-9	稳定化过程	162
5-10	要点和复习题	165
	习题	166
第六章	滤波器设计概论	170
6-1	理想低通滤波器	170

6-2	物理上的可实现性及技术指标	172
6-3	幅度和相位失真的效应	174
6-4	数字滤波器的其它技术指标	180
6-5	要点和复习题	181
	习题	182
第七章	FIR滤波器的设计	184
7-1	引言	184
7-2	截断、加窗和延迟	186
7-3	设计实例	193
7-4	等波纹 FIR 滤波器	199
7-5	要点和复习题	208
	习题	209
第八章	IIR 滤波器的设计	211
8-1	引言	211
8-2	模拟滤波器的设计	212
8-3	模拟频率变换	225
8-4	数字低通滤波器的设计: 冲激不变法	234
8-5	数字频率变换	239
8-6	双线性变换	250
8-7	模拟到数字直接变换	259
8-8	相位均衡器: 数字全通滤波器	266
8-9	要点和复习题	272
	习题	276
第九章	数字滤波器的实现	279
9-1	用DFT求离散卷积	280
9-2	运算次数	285
9-3	结构框图	283
9-4	有限字长的效应	292
9-5	一阶和二阶的传递函数	296

9-6 灵敏度比较	300
9-7 级联和并联结构	304
9-8 FIR 滤波器	310
9-9 要点和复习题	312
习题	314

第三部分 统计方法

第十章 时域离散随机过程和最佳滤波器	317
10-1 引言	317
10-2 密度函数、平均值和方差	318
10-3 时域离散随机过程	322
10-4 时间平均	325
10-5 功率谱密度	327
10-6 线性滤波器的响应	329
10-7 互相关	335
10-8 应用	336
10-9 要点和复习题	339
习题	340
第十一章 误差分析	342
11-1 引言	342
11-2 数的表示法	343
11-3 误差模型	347
11-4 位数的确定	352
11-5 要点和复习题	359
习题	359
第十二章 功率谱的测量	361
12-1 一致估计	361
12-2 平均值的估计	363
12-3 自相关的估计	366

12-4	周期图	369
12-5	平均周期图	372
12-6	平滑周期图	374
12-7	数字谱分析仪	376
12-8	用FFT 求相关	378
12-9	平滑周期图的计算	381
12-10	要点和复习题	387
	习题	388
第十三章 维纳 FIR和IIR 滤波器		390
13-1	引言	390
13-2	维纳FIR 滤波器	392
13-3	维纳 FIR 滤波器的迭代计算	397
13-4	维纳 IIR 滤波器	400
13-5	因果维纳 IIR 滤波器的导出	405
13-6	要点和复习题	414
	习题	415
附录 二阶数字滤波器的硬件实现 (Y.C.Jenq)		418
参考文献		427
索引		430

第一部分 数字谱分析

第一章 概 论

1-1 时域连续信号、时域离散信号和数字信号

这是一本关于信号处理的教科书，因此应当首先讨论什么是信号。粗略地说任何带有信息的事物都能称为信号，例如语音、电报和心电图都是信号。银行的利率、国家的失业率以及由宇宙飞船拍摄的火星照片也可被认为是信号。

信号可以是一个、两个或三个独立变量的函数。语音和银行的利率是一个独立变量，即时间的函数。图形为两个独立变量的函数。风速和温度是三个独立变量的函数，它们依赖于纬度、经度和高度。在本书中我们只研究作为一个独立变量函数的信号。这类信号称为一维信号，并将独立变量不失普遍性地设为时间。

基本上有两种类型的信号：时域连续信号和时域离散信号。如果信号定义在时间的连续区域上如图1-1所示，则称之为时域连续信号。语音、温度、地震波和利率就是这类信号。石溪(Stony Brook)^①的温度可取 -10°C 到 35°C 之间的任何值，而利率通常只取如5%、5.125%和5.25%这样的离散值。换句话说，时域连

① 美国地名。——译者注

续信号的幅度可取一个连续区域内的任何值或者只是取在规定的离散集合中的任何值。时域连续信号通常和某一个物理量有相同的波形，因此也称之为模拟信号。

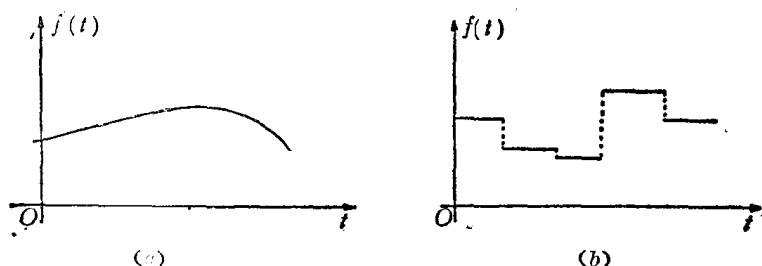


图1-1 (a)幅度取连续区域内任何值的模拟信号

(b)幅度只在离散集合中取值的模拟信号

如果信号只定义在如图 1-2 所示的离散的时刻上，则称其为时域离散信号。每一个时域连续信号如果在离散的时刻记录或测量都可当做时域离散信号处理。例如，在石溪每天中午记录下的温度序列，构成了时域离散信号。存在于全部时间，但只在离散的时刻改变其值的信号，如图 1-1 (b)所示，也可当作时域离散信号处理。类似于时域连续信号的情况，时域离散信号的幅度

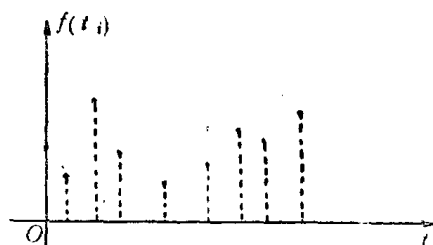


图1-2 时域离散信号

可取连续区域内的任何值或者取规定的离散集合中的任何值。为便于引用，我们用时域离散信号专门表示那些幅度可取连续区域内任何值的信号，并将幅度只能在离散集合中取值的信号称为数字信号。我们在图 1-3 中给出一个数字信号，信号的幅度只能

取由水平线标记的值。在应用中遇到的最主要的数字信号是数字电子计算机所处理的信号。数字电子计算机只能接收数字的序列（时域离散），并且数的取值受到计算机字长的限制。因此数字电子计算机处理的信号必须是数字信号。

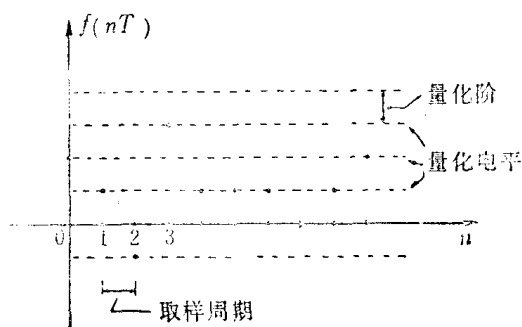


图1-3 数字信号

在本书中，信号出现的离散时刻取相等的间隔。这样，时域离散信号或数字信号都能用如图1-3所示的 $f(nT)$ ($n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$) 来表示。常数 T ，是信号出现的时间间隔，称之为取样周期或取样间隔。在数字信号中，如果它的幅度所取的值是等间隔的，则称增量为量化阶，如图1-3所示，称允许取值为量化电平。如果时域离散信号由数字信号来近似，则时域离散信号的幅度必须由量化电平来近似，这称为幅度量化或简称量化。由这种近似带来的误差叫量化误差。

每当使用专用硬件或用计算机算法处理时域离散信号时，该信号必须用一个数字信号近似（因为受寄存器或字长限制）。但为了数学上的方便，在设计时将每个数字信号都视为时域离散信号，所以在本书大部分章节里我们并不对这两个信号加以区别。对于它们之间的差异将单独讨论。

信号处理的研究包括两个主要部分：信号分析和信息处理机

的设计。在信号分析中，我们感兴趣的是信号的特征或信号所含的信息。一个信息是包含了全部有用的信息？还是在取得信号的过程中信号受到了不需要的信号和噪声的干扰？在信息处理机的设计中，我们设计从信号中消除噪声或者处理信号的系统，以使信号更高效地传输。任何一个处理数字信号的系统（硬件或软件）都可被称为数字系统或数字滤波器。本书主要涉及数字信号分析和数字滤波器的设计问题。

1-2 数字信号的代表法

用电报传送的消息是数字信号。它由传送的26个字母符号、10个数字符号以及句点、逗点等组成。这些符号当然可以由不同的电压值表示，例如用10伏表示A，9.5伏表示B，9伏表示C等等。但这种表示方法常因其易受噪声、电源电压漂移和其它干扰影响而不被采用。实际上，这些符号被编为划和点的序列或与之等效的1和0的序列。符号1可用幅度为2-4伏的脉冲表示。符号0可用不出现脉冲或幅度小于0.5伏的脉冲表示，这种表示法受噪声的影响显然要小得多，尤其是它很容易实现，因此实际实现时数字信号总是用1和0编码。应用1和0的序列的信号表示法称为二进制编码。

二进制编码有许多形式。在这里介绍最常见的一种，称为原码。考虑如下的 a_i 序列：

$$\begin{array}{ccccccc} a_0 & a_1 & a_2 & a_3 & . & a_4 & a_5 \\ \text{符号位} & 2^2 & 2^1 & 2^0 & & 2^{-1} & 2^{-2} \end{array}$$

其中 a_i 为二进制数字或比特，它只能取0或1。这个序列中共有6位码，第一位表示数字的符号，称之为符号位。若 $a_0 = 0$ ，序列表示正数；若 $a_0 = 1$ ，序列表示负数。其余的五位表示数的大小。在 a_i 下面给出每个 a_i 表示数的数值。显然， a_1 是最高有效位

(MSB), a_i 是最低有效位 (LSB)。下面举例说明将二进制数转换为十进制数:

$$1101.01 \longleftrightarrow - (1 \times 2^3 + 0 \times 2^2 + 1 \times 2^0 + 0 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2}) = -5.25$$

$$0011.11 \longleftrightarrow + (0 \times 2^2 \textcircled{1} + 1 \times 2^1 + 1 \times 2^0 + 1 \times 2^{-1} + 1 \times 2^{-2}) = 3.75$$

我们再用一个例题^②说明十进制数转换成原码的步骤。考虑数 -35.6875 。在编码时我们分别考虑整数部分及小数部分。对于整数部分, 将它逐次除以 2, 如:

2 35	余数
2 17	1
2 8	1
2 4	0
2 2	0
2 1	0
0	1

从这个余数就得到 35 的二进制编码为 100011。对于小数部分逐次乘以 2, 如:

$$2 \times 0.6875 = 1.375$$

$$2 \times 0.375 = 0.75$$

$$2 \times 0.750 = 1.5$$

$$2 \times 0.50 = 1.0$$

由每个乘积的整数部分得到 0.6875 的二进制编码为 .1011。因此 -35.6875 的原码为 1100011.1011。

① 此项为译者所加, 以使之更加明确。——译者注

② 例题的目的是说明十进制数确实可用二进制形式编码。本书其余部分不需要写出编码过程。

1-3 数字技术和模拟技术的比较

数字信号在传输和处理中用二进制数 0 和 1 编码。0 和 1 的处理几乎不受噪声影响。因此，数字信号的处理比模拟信号的处理更可靠。使用检错码和纠错码可进一步增强可靠性。在检错码中，用比所需更多的码位可能检测出是否存在误码，如果使用多位附加码，则可能检测出误码，并校正它。而在模拟信号的传输中不可能采用这种高可靠性的方式。

向地球传送用宇宙飞船拍摄的火星照片，是一个给人以深刻印象的数字处理的实例。发射机的功率为 10 瓦。在信号传送超过 200×10^6 公里之后接收到信号的功率只有 10^{-18} 瓦的数量级。如果信号用模拟技术传输，接收信号会被噪声严重地破坏，以致无法使用。然而，人们利用数字技术传送到地球的火星照片，却具有令人难以置信的清晰度。

在实现模拟系统时精确度常常受到限制。例如，假设在设计时域连续滤波器时求出需要的电感、电容、电阻的最佳值分别为 1.249 毫亨，84.33 微法和 10.6 欧姆。但在实际实现这个滤波器时，要得到具有如此精确数值的元件很困难。比如说能取到 1.29 毫亨，86.2 微法和 10 欧姆我们就满足了。因此建立一个精密的模拟系统的费用很昂贵。在数字系统中不存在这样的问题，可以简单地通过增加编码和处理中所用的位数来提高数字系统的精确度。

在数字处理中，如图 1-4(a) 所示，可以用同一个数字系统来处理许多不同的数字信号。例如，若信号 $u_1(n)$ 的取样周期为 0.05 秒，而计算 $y_1(n)$ 只需要 0.005 秒，于是数字系统在后面的 0.045 秒是空闲的，如图 1-4(b) 所示，这段时间可以用于处理其它信号。事实上，这样一个数字系统能完成多到 10 个同样的处理。这