

[美] W. D. 斯坦利 著

数字信号处理

SHUZI XINHAO CHULI

科学出版社

0294887

数字信号处理

〔美〕W. D. 斯坦利 著

常 迥 译



21113000766906



科学出版社

1979

内 容 简 介

本书是有关离散信号分析和数字信号处理的入门书，是一本导论性质的基础理论书。

全书共分十章，前四章主要是讨论连续时间系统和离散时间系统的分析方法，包括了拉普拉斯变换(LT)、傅里叶变换(FT)和Z变换(ZT)。至于离散傅里叶变换(DFT)、快速傅里叶变换(FFT)以及离散傅里叶变换的应用则放在全书最后两章里讨论。第五章讨论离散时间系统的实现及其频率响应。第六章讨论了模拟滤波器的特性。这两章是为第七和第八两章讨论数字滤波器时做好准备。第七章和第八章分别讨论无限冲激响应型式数字滤波器的设计和有限冲激响应型式数字滤波器的设计。

本书是一本基础理论书，因而不包括数字处理单元的实际细节和计算机的计算程序。

本书主要可用做通信、雷达、自动控制等专业的大学教科书，工程技术人员的参考书和自修书。书中附有例题和习题，可帮助读者自学。

W. D. Stanley

DIGITAL SIGNAL PROCESSING

Reston Publishing Company, INC., 1975

数 字 信 号 处 理

[美] W. D. 斯坦利 著

常 迥 译

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1979年10月第一版 开本：787×1092 1/32

1979年10月第一次印刷 印张：10 3/4

印数：0001—27,100 字数：241,000

统一书号：15031·246

本社书号：1491·15—7

定价：1.10 元

前 言

在过去几年里,在各种信号处理的应用中,数字技术的利用已有很大的增长,这种趋势可望还要继续若干年.过去仅包含有模拟线路的系统现在则多与数字电路相结合来完成许多所需的功能.各种不同水平的工程人员现在都需要探讨这样的系统.特别是对电子硬件的发展和设计的影响更为显著.

本书的主要目的就是在已有的线性系统概念和滤波器设计的基础上,对数字信号处理的一些基本概念提供一个导论性的阐述.编写本书的动机是因为著者认识到这样一本导论水平的书目前是很需要的.大多数的杂志论文和直接用于数字处理的教科书都是按较高的水平编写的,假定读者已具有这部分的数学基础.因此,如果这本书能为那些不具有或稍有数字系统理论知识的读者准备了足够的基础来进一步理解这方面的大量有用文献的话,那么这本书就算达到了它的主要目的之一.但著者同时还认为这本书为使读者能够实际规划和设计数字信号处理系统的主要部分也提供了足够的知识.

在第一章中,为数字信号处理给出了定量的讨论,并概述了它的一些应用.有关连续时间线性系统理论的一些重要基础则在第二章中加以综述.在第三章里讨论了傅里叶级数和频谱分析的技术,并阐明了抽样信号及其频谱的概念.离散时间系统的基本理论是在第四章中讨论的.关于离散时间系统的实现过程以及这种系统的频率响应概念则放在第五章中

讨论。在第六章里对模拟滤波器的主要型式做一概括性的叙述。在第七章中给出有关无限长冲激响应型式数字滤波器的综合性的讨论，而在第八章里所讨论的则是有限长冲激响应型式数字滤波器的设计。在第九章中阐述了快速傅里叶变换的各种特性，这种概念的各种应用则放在第十章中讨论。

有关数字处理单元的一些实际细节，如加法器、乘法器等，等非本书所讨论的范围。关于数字硬件设计的问题已有不少好书可以参考。此外，应指出这是一个发展十分迅速的领域，要想在这样一本教科书中表达出它的最新技术几乎是不可能的。系统设计者在不久前还需要用离散系统来实现的许多数字功能，现在却很可能已经以集成电路的形式而搁置一旁了。因此，本书是要集中于理论问题以及关于它的适当算法的发展和信号处理的概述，而这些方面是不会很快变得陈旧的。

著者认为这本书可以用于以下各目的：(a)在数字信号处理方面做为正式大学课程的教科书，适用于大学的高年级水平或研究院的低年级水平；(b)在相同领域中做为不计学分的职业课程的教科书或参考书；(c)做为学习数字信号处理基础的实际工程人员的自修读本。大量的例题和习题为上述第三项目的提供了使用价值。

本书内容的安排是使数字信号处理的一些基本概念得到逐步的深入，这是假设许多读者在阅读过程中还必须复习和加强他们对连续时间系统的理解。但是，读者在基本理论上应具有一定的基础，应该能够进入到本书的任何章节而没有什么很大的困难。

W. D. 斯坦利

译 者 的 话

数字信号处理是研究用数字或符号的序列来表示信号以及对这些序列作处理。由于数字信号在时间上和数值上是离散的，因此，它可以直接利用数字计算机来进行分析、变换以及其它形式的处理。处理的目的是为了削弱信号中的多余内容，滤除混杂的噪声和干扰，便于估计信号的特征参数，或变换成容易分析和辨识的形式。过去多是对模拟信号进行处理，近年来，由于高速数字计算机的发展，大大促进了数字信号的处理。这方面的进展主要体现在许多巧妙的信号处理的算法。其中最突出的是数字滤波的算法和快速傅里叶变换的算法。快速傅里叶变换的算法不仅把傅里叶变换的计算时间缩短了几个数量级，而且可以直接计算离散时间信号和序列，这就使许多数字信号处理的应用成为现实。本书选取数字滤波器和快速傅里叶变换做为重点内容是恰当的。

数字信号处理的应用是十分广泛的。其重要性正逐渐为人们所认识。现已卓见成效的应用包括在：数据通信、语言通信、自动控制工程、生物医学工程、遥感技术、雷达技术、图象传输技术以及核物理、地震学、波谱学和振动学等等方面。无疑地，数字信号处理技术将为各门技术科学的发展提供一有力的工具。实际的应用问题非本书的讨论范围。但书中所论述的基本概念和基本方法对各种应用问题的理解都是很有用处的。

本书的特点在于它是一本导论性质的基础理论书。正如著者在前言中所指出的那样，是为对离散系统理论和数字信

号处理了解得比较少或根本没有接触过的读者提供一本入门的基础书,为进一步学习较深入的专著或参考文献做准备.因此,特别注意到基本概念和基本方法的阐述.当然,这本书也有许多不足之处,好在还有许多同类性质的书,可做补充和参考¹⁾.

由于教学的需要,本书是在匆忙中赶译出来的,错误一定不少,切望读者指出,以便重印时修改.

1978年10月

1) 可参看: A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, Digital signal processing, 1975. 该书译本即将由科学出版社出版. ——译者注

目 录

第一章 数字信号处理的一般概念

1-0 引言	1
1-1 概论	1
1-2 处理形式	8
参考文献	10

第二章 连续时间系统的分析

2-0 引言	11
2-1 时域简述	11
2-2 拉普拉斯变换方法	15
2-3 转移函数	19
2-4 极点、零点与稳定性	22
2-5 稳态频率响应概念	27
习题	32
参考文献	35

第三章 傅里叶分析与抽样数据信号

3-0 引言	36
3-1 傅里叶级数	36
3-2 傅里叶变换	39
3-3 抽样数据信号	43
3-4 理想冲激抽样	47
3-5 保持电路	51
习题	54
参考文献	57

第四章 离散时间系统分析

4-0 引言	58
--------------	----

4-1	离散时间信号	58
4-2	Z 变换	60
4-3	转移函数	66
4-4	逆 Z 变换	68
4-5	响应形式与稳定性	77
4-6	离散时间卷积	80
	习题	81
	参考文献	84

第五章 离散时间系统的实现与频率响应

5-0	引言	85
5-1	离散时间系统的运算	85
5-2	直接实现形式	88
5-3	参量量化效应	92
5-4	级联和并联的实现形式	93
5-5	稳态频率响应概念	101
5-6	幅度响应特性	111
	习题	115
	参考文献	117

第六章 模拟滤波器特性

6-0	引言	118
6-1	理想频域滤波器模型	118
6-2	一般方法	124
6-3	巴特沃思(Butterworth)逼近	128
6-4	切比雪夫(Chebyshev)逼近	130
6-5	其它逼近方法简介	135
6-6	滤波器设计数据	139
6-7	从低通到带通的变换	143
6-8	从低通到带阻的变换	149
6-9	从低通到高通的变换	152
6-10	滤波器响应曲线	155

习题	162
参考文献	166
第七章 无限冲激响应型式数字滤波器的设计	
7-0 引言	167
7-1 概述	167
7-2 符号商榷	172
7-3 双线性变换方法	172
7-4 双线性变换设计示例	181
7-5 双线性变换的数值分析	190
7-6 冲激不变方法	191
7-7 阶跃不变方法	194
7-8 带通数字滤波器设计	199
7-9 带阻数字滤波器设计	207
7-10 高通数字滤波器设计	209
习题	211
参考文献	214
第八章 有限冲激响应型式数字滤波器的设计	
8-0 引言	216
8-1 概论	216
8-2 傅里叶级数方法	218
8-3 窗函数	227
习题	240
参考文献	243
第九章 离散傅里叶变换与快速傅里叶变换的基本特性	
9-0 引言	245
9-1 傅里叶变换形式	245
9-2 离散傅里叶变换 (DFT)	253
9-3 DFT 的奇偶特性	256
9-4 DFT 的函数运算	260
9-5 快速傅里叶变换 (FFT)	264

9-6 算法综述	268
习题	282
参考文献	284
第十章 离散傅里叶变换的应用	
10-0 引言	285
10-1 利用 DFT 对连续时间变换的逼近	285
10-2 DFT (或 FFT) 参量的选择	291
10-3 利用 FFT 进行卷积	293
10-4 功率谱	304
10-5 相关分析与统计分析	306
10-6 频率抽样滤波器	312
习题	317
参考文献	318
附录	320
索引	327

第 一 章

数字信号处理的一般概念

1-0 引言

近年来,为完成各种信号处理的功能采用数字计算机和特种数字电路来代替原来所用的模拟设备已有很大的进展。由于相当便宜的集成电路的不断革新,已做出各种微处理机和小型计算机。它们可用来完成不同的信号处理功能。做成与以前全模拟性质的系统具有相同大小和相同成本限制的特殊目的的数字处理器现在已经成为可能。

在本章中,只是一般地讨论几个与数字信号处理有关的基本概念。主要目的是为在以后各章中讨论一些概念以前,先给读者做一简要的概述。

1-1 概论

在开始讨论正文前,先明确几个常用的名词定义,与IEEE 声频和电声组所建议的定义和术语相一致^[1]。

所谓模拟信号是指: 在规定的连续时间内,信号的幅值可以取连续范围内的任意数值。这样的连续时间函数所表示的信号就是模拟信号,如正弦函数、阶跃函数,以及由传声器等所产生的信号都属于模拟信号。“模拟”这个名词显然是从模拟计算演变出来的。在模拟计算中,电压和电流做为实际变量,但“模拟”的意义已经大大超出了这一范围。

连续时间信号是指: 在连续时间范围内所定义的信号,但信号的幅值可以是连续数值,也可以是离散的数值。模拟信

号可以看作连续信号的一个特例。实际上，“连续时间信号”与“模拟信号”这两个名词可以相互通用，并且经常用来说明同一信号。因为“模拟”与“模仿”容易混淆起来，所以在多数情况下以采用“连续时间信号”为宜，只有当与“数字”相提并论时，才用“模拟”这个名词。

“量化”这个名词是：利用一组数值来表示变量的过程。所谓“量化变量”实际上就是一组不同的数值。

离散时间信号是指：在一组特定的时间下，表示信号数值的函数，也就等于说，做为独立变量的时间变量被量化了。如果离散时间信号的幅值是连续值，则有时又称为“抽样数据”信号。抽样数据信号可以理解为在离散时间下对模拟信号的抽样。

数字信号是在时间上和幅值上都是经过量化的信号。数字信号总是可以用一序列的数来表示，而每一个数又是由有限个数码来表示的。

“离散时间”和“数字”两个名词在实际应用中经常是指同一种信号。关于离散时间信号的一些理论也适用于数字信号，所以这两个名词无需严格区分。“离散时间”多用于理论问题的讨论，而“数字”这个名词却更习惯用于讨论硬件和软件设备。

根据所选用的硬件和软件的形式以及所用信号的性质来确定系统的名称，是比较合适的。例如，“模拟系统”、“数字系统”、“连续时间系统”与“离散时间系统”等等。

所谓“线性系统”是指：它的参数与输入激励信号的性质和幅度无关，也就是满足叠加定理的系统。一线性系统可以利用线性的微分方程和差分方程来表示。线性时不变系统是指：系统参数是固定的，不随时间而变的系统。

集总系统只包括有限非零元件，满足常微分方程和差分

方程,与满足偏微分方程的分布系统相对比。本书不讨论分布系统。

在进行理论研究时,经常需要特别指出所讨论的系统是:(a)连续时间、线性和时不变系统,还是(b)离散时间、线性,和时不变系统。为书写方便起见,用 CTLTI 系统代表(a),用 DTLTI 系统代表(b)。

数字信号处理中所采用的典型数字形式是二进制数系,仅用 0 和 1 两个数值来表示所有可能的数。一个数值为 m 的数可以用一包括有 n 个二进制码(码位)的数来表示:

$$m = 2^n \quad (1-1)$$

相反地,如果 m 是所需的可能电平数,则所需的码位 n 等于或大于 $\log_2 m$ 的最小正整数。

完成数字信号处理的步骤可借助于如图 1-1 所示的简单系统来说明。信号电压从 0 伏变到 7 伏,共分 8 级,每级有 1 伏的增量,用二进制数表示,波形如图 1-2。输入信号首先通过一连续时间的预抽样滤波器,它的功能将在后面讨论。然后利用一抽样器每隔 T 秒读出一数据。抽样值再量化为标准电平。虽然有不同的抽样方法,但它们的共同目的是将抽样值表示为最接近的量化电平。例如,4.2 伏的抽样值量化为 4 伏,4.6 伏的抽样值量化为 5 伏。

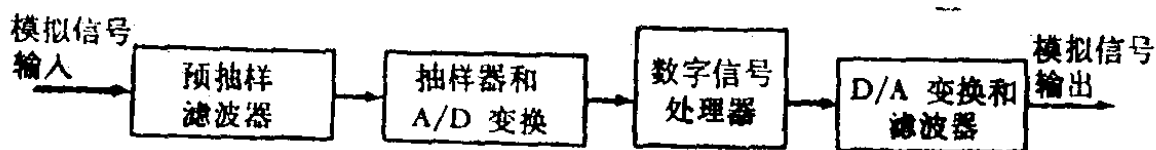


图 1-1 数字处理系统的简单方块图

信号的处理过程如图 1-2 (a)和(b)所示。信号的抽样脉冲应该做得很窄,以便在空余时间内进行多路复用。这些抽样脉冲可以表示为如图 1-2(c)所示的二进制数。在图中是用了较宽的时间间隔来表示这些量化的二进制数,实际上,代表

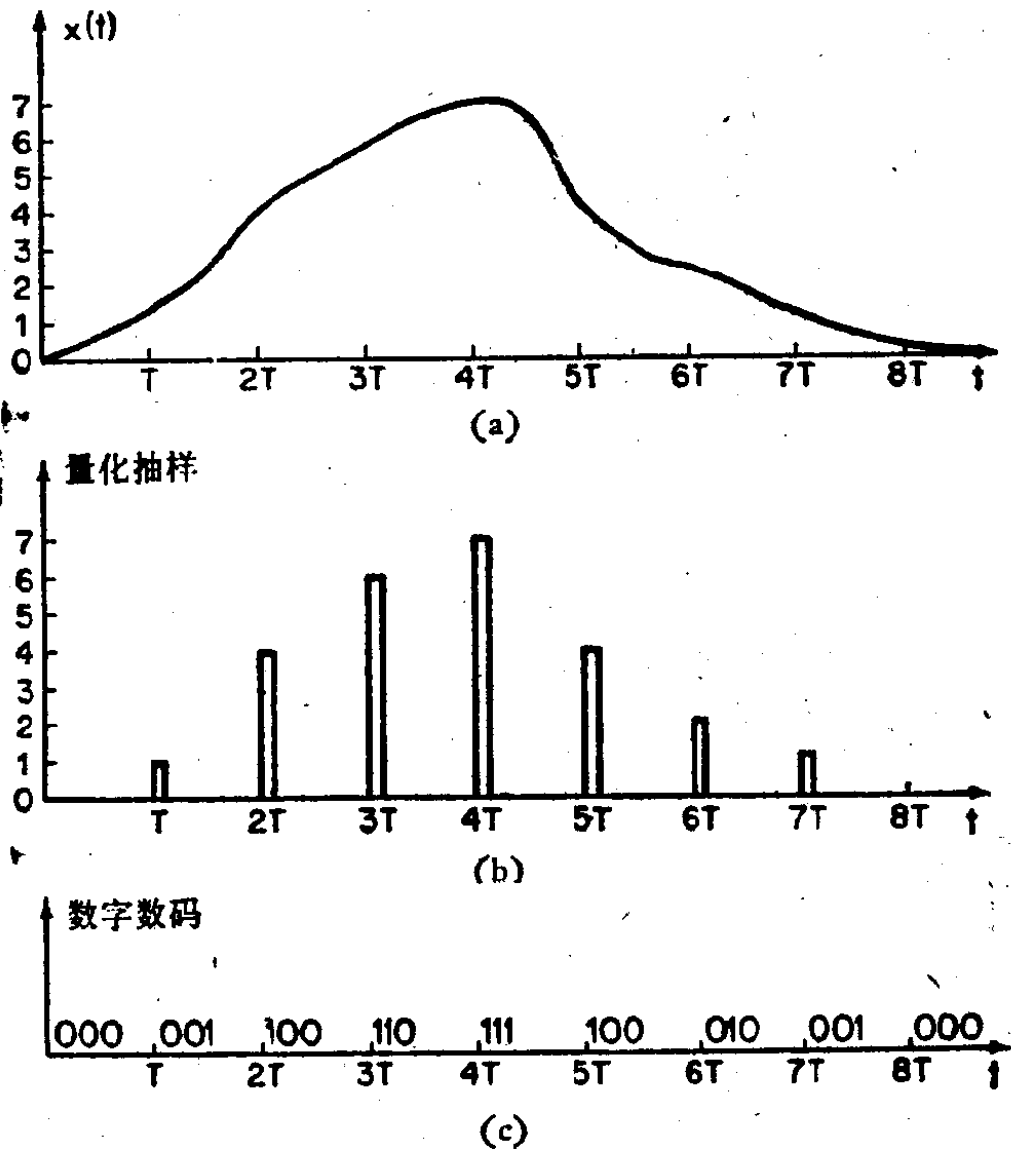


图 1-2 抽样与数字转换过程

二进制数的码位间隔应该很短，留有足够的空余时间为其它信号使用。

模拟信号的抽样和量化以及转换成为二进制数的过程总称为模数转换 (A/D 转换)。一般情况下，信号的动态范围必须与 A/D 转换器相适应，所用的码数应该满足准确度的要求。

应该采用与应用性质相适应的计算设备来进行信号处理。所需计算设备可以是通用计算机、微型计算机、或特为专用设计的计算机。无论怎样，应该包括一些典型数字线路的组合来进行各种数学函数的运算，如加、减、乘等运算。此外，

还应该有足够的逻辑储存能力。

在处理器的输出端,数字信号可以再转换为模拟信号,利用数模转换(D/A转换)来完成,在这转换过程中,二进制数首先转换为连续时间脉冲。脉冲之间的空隙则利用所谓“重建滤波器”填充起来。这滤波器包括一保持电路,这个电路把脉冲值在相邻脉冲间隔中保持下来。在有些情况下,这个保持电路还应该设计得使它能够按照预定的输出曲线在相邻点之间对输出信号进行外推逼近。除保持电路之外,还需要利用连续时间滤波器来改进各点之间的平滑程度。

在这里会提出一个这样的基本问题:输入信号经过这种处理过程,是否会失掉一些信息。不管怎样,信号既然是按离散时间抽样的,那么是否会把抽样点间的信息失掉了呢?此外,在量化过程中,实际的信号幅值是用它最接近的标准电平所代替,这就可能在幅值上引入了误差。

关于抽样问题,将在第三章中讨论。如果信号的频带是有限的,而抽样率又是大于或等于两倍的最高频率,则在理论上可以根据它的离散抽样值完全恢复出原始信号。这相当于在最高频率时,每一周期最少提取两个抽样值。实际上,为了保证信号质量,选用的抽样率经常是大于最小的抽样率,是最高频率的三倍到四倍。例如,模拟信号的最高频率为 5 kHz,理论的最小抽样率则为每秒内取 10,000 个抽样值,而实际系统则选得高一些。输入的连续时间信号先通过一个“低通模拟预抽样滤波器”来保证输入信号不致超过最高频率,以便经过处理后恢复出原始信号。

如果信号的抽样率不满足上面所说的条件,抽样率不够高,则将产生所谓“混叠现象”。这将会造成在恢复信号时,原信号中的频率分量将在完全不同的频率处出现。例如,如果对包括从直流到 5 kHz 的输入信号按 6kHz 的抽样率抽样,显

然抽样率太低不足以保证信号的恢复。如果试图恢复原来的信号，则原信号中 5 kHz 的频率分量将变为 1 kHz 的信号，造成一个误差信号。这种现象的一个常见例子就是我们称之为“车轮效应”，在电影上有时可能会看到车轮好象在向后转。因为影片中每一帧相当于一次离散的抽样，如果车轮转动的速率远远大于换帧的速率时，车轮将呈现反转或转动得很慢。为了免除由于杂散信号频率过高，造成这种错误，“预抽样滤波”器的效果就是用来解决这个问题。

关于量化误差，如果码位选得足够多则误差可以做得很小。当然，在实际量化时，存在有一定的最大限度，因此就必须容许有一定的误差。即使在连续时间系统中也是有噪声存在的，因而在实际的幅值上也将引入一些不确定的因素。在数字抽样过程中这种不定因素的引入一般称之为量化噪声。

令 $E_{\max}$ 和 $E_{\min}$ 代表信号的最大值和最小值，并令 q 代表两相邻量化电平之间的垂直距离。符号 n 和 m 如前所定义，因而有

$$q = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{2^n} = \frac{E_{\max} - E_{\min}}{m} \quad (1-2)$$

假设将两相邻量化电平之间的一个抽样值指定给靠近它的一个量化电平，这样量化噪声的峰值和量化噪声百分比的峰值就为

$$\text{量化噪声峰值} = \frac{q}{2} \quad (1-3)$$

和

$$\text{量化噪声百分比的峰值} = \frac{100\%}{2m} \quad (1-4)$$

在很多情况下，量化噪声的方差要比它的最大值更为重要。方差是与噪声的平均功率成正比的。如果在量化电平之间信号是均匀分布的，则根据统计分析可以证明：噪声方差 σ^2 为