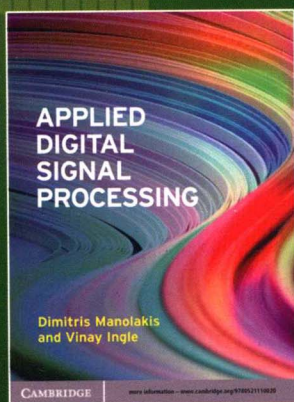


国外电子与通信教材系列

CAMBRIDGE

实用数字信号处理

Applied Digital Signal Processing
Theory and Practice



[美] Dimitris G. Manolakis 著
Vinay K. Ingle

艾渤 程翔 刘翼如 译



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

国外电子与通信教材系列

实用数字信号处理

Applied Digital Signal Processing
Theory and Practice

[美] Dimitris G. Manolakis Vinay K. Ingle 著

艾渤 程翔 刘翼如 译

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书系统地阐述数字信号处理的基本概念和方法,介绍连续时间域和离散时间域中信号、系统的相关概念与基本理论,傅里叶变换,数字滤波器的理论和设计,讲解多速率信号处理、随机信号处理及有限精度对数字信号处理运算的影响。全书结合了 DSP 理论与实践,内容系统全面,章节安排由浅入深,概念清晰,图文并茂,范例丰富。除提供大量图解、MATLAB 范例、学习小结、复习题,还提供配套网站供读者下载资源。

本书可作为电子与计算机工程专业高年级本科生和低年级研究生的教材,也可作为广大研究人员和工程师的参考资料。

Applied Digital Signal Processing: Theory and Practice, 978052110020 by Dimitris G. Manolakis, Vinay K. Ingle (first published by Cambridge University Press © 2011). All rights reserved.

This simplified Chinese edition for the People's Republic of China is published by arrangement with the Press Syndicate of the University of Cambridge, Cambridge, United Kingdom.

© Cambridge University Press & Publishing House of Electronics Industry 2018.

This book is in copyright. No reproduction of any part may take place without the written permission of Cambridge University Press and Publishing House of Electronics Industry.

This edition is authorized for sale in China Mainland.

本书原版由 Cambridge University Press 出版。

本书中文简体翻译版由 Cambridge University Press 授权电子工业出版社。

Copyright © Cambridge University Press 和电子工业出版社 2018。

未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

此版本经授权仅限在中国大陆销售。

版权贸易合同登记号 图字: 01-2013-7761

图书在版编目(CIP)数据

实用数字信号处理/(美)迪米特里·G. 马诺莱克斯(Dimitris G. Manolakis), (美)维奈·K. 英格尔(Vinay K. Ingle)著; 艾渤等译. —北京: 电子工业出版社, 2018.6

书名原文: Applied Digital Signal Processing: Theory and Practice

国外电子与通信教材系列

ISBN 978-7-121-34070-3

I. ①实… II. ①迪… ②维… ③艾… III. ①数字信号处理—高等学校—教材 IV. ①TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 077229 号

策划编辑: 谭海平

责任编辑: 谭海平 特约编辑: 王 崧

印 刷: 北京京师印务有限公司

装 订: 北京京师印务有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编: 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 40 字数: 1100.8 千字

版 次: 2018 年 6 月第 1 版

印 次: 2018 年 6 月第 1 次印刷

定 价: 118.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zllts@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式: (010) 88254552, tan02@phei.com.cn。

译者序

随着计算机和信息技术的飞速发展,20世纪60年代数字信号处理(Digital Signal Processing, DSP)应运而生。在当今的数字化时代背景下,DSP技术迅速发展,已成为通信、计算机、消费类电子产品等众多领域的核心基础,被誉为信息社会革命的旗手。而在通信、计算机等学科中,数字信号处理也早已成为关键的专业课程之一。

本书是作者多年来科学研究与教学的结晶,系统地阐述了数字信号处理的基本概念和方法,介绍了连续时间域和离散时间域中信号、系统的相关概念与基本理论,傅里叶变换,数字滤波器的理论和设计,讲解了多速率信号处理、随机信号处理及有限精度对数字信号处理运算的影响。全书内容系统全面,章节安排由浅入深,概念清晰,图文并茂,范例丰富。

本书主要的特点是完美地结合了DSP理论与实践。如作者所述,虽然目前已有一些优秀的DSP理论教科书或强调DSP算法的应用书籍,但却没有很好地结合DSP理论与实践的书籍。作者根据自身的教学思考,精心编撰了全书的内容,提供了丰富的范例与MATLAB函数脚本,可指导学生和执业工程师循序渐进地理解DSP的科学原理,同时深入掌握其实际应用和限制。除提供大量图解、MATLAB范例、学习小结、复习题外,本书还提供了配套网站供读者下载资源。

本书可作为电子与计算机工程专业高年级本科生和低年级研究生的教材,也可作为广大研究人员和工程师的参考资料。全书的组织架构由浅及深,内容覆盖广泛,因此也可灵活地应用于其他课程的学习。例如,书中前6章适用于初级信号与系统课程,前11章适用于高年级本科生或低年级研究生的DSP课程,后4章适用于高年级研究生的现代信号处理课程。

本书由北京交通大学艾渤教授、北京大学程翔教授、北京交通大学刘翼如博士共同完成翻译、录入和校对。前言和第1~3章由艾渤翻译,第4~8章由刘翼如翻译,第9~15章由程翔翻译,全书统稿由艾渤完成。借此机会,对所有为本书付出艰辛和支持的同仁表示衷心的感谢。

翻译过程中难免存在疏漏不当之处,恳请读者不吝指正。

译者

2018年4月于北京交通大学

前 言

过去三十多年来，数字信号处理（Digital Signal Processing, DSP）已发展为电子与计算机工程的核心领域。今天，DSP 已能为科学、工程和多媒体应用中的实际问题提供求解方法与算法。

尽管目前关于 DSP 理论与算法的教材已有很多，但我们仍觉得有必要撰写一本介绍 DSP 理论与实践的教材，以帮助学生和工程师了解 DSP 的基本原理、应用限制及实际应用。

目标

本书的主要目的是为读者系统地介绍数字信号处理的基本概念和方法，次要目的是为学生、研究人员、工程师的深入学习与研究奠定坚实的基础。因此，本书的理论部分只介绍最核心的内容，而实践部分介绍的内容非常宽泛。本书的宗旨是帮助学生直观地了解 DSP 的工作方式，并应用 DSP 来解决实际问题。

教学方式

根据多年关于“数字信号处理”课程的教学经验，我们认为：数学分析方法和计算机仿真结合，可提高“数字信号处理”课程的教学质量。因此，书中采用了数学工具，并为说明核心信号处理算法的应用引入了 MATLAB 代码。不熟悉连续时间信号和系统的基础知识，就无法深入理解和掌握 DSP。为帮助读者掌握 DSP 理论及其应用，书中加入了关于连续时间信号与系统的内容，已掌握这部分内容的读者可跳过这些内容。这样做的优点是，以连续时间角度来解释和分析一些概念，要比以离散时间角度更为容易。

教学资源

为提升 DSP 的教学质量，本书提供大量教学资源，具体如下：

- 图形。图形说明了每种方法的工作方式，或证明了某种 DSP 方法的性能。
- 示例。书中提供了大量示例，为反映实际情况，许多示例由 MATLAB 生成。示例的作用是证明重要概念，引导读者实际应用各种方法。
- MATLAB 函数和脚本。为帮助读者应用各种算法和模型来解决实际问题，本书为所有主要算法提供 MATLAB 函数，并给出使用这些函数的一些示例。
- 学习小结。每章的最后为回顾本章重要概念的学习小结。
- 复习题。每章最后提供加深读者了解概念的复习题。
- 习题。每章提供大量习题，内容从简单的理论应用和计算，到复杂的分析和设计任务。
- 配套网站（www.cambridge.org/adsp）。配套网站为读者提供更为深入的资料、信号数据集、MATLAB 函数及 PPT 等。
- 习题解答手册。手册中包含书中所有习题的答案，具体申请方式可参见上述配套网站。

适用读者

本书主要面向电子与计算机工程专业的高年级本科生和低年级研究生，也适用于广大研究人员、工程师。学习本书时，要求读者先修微积分、复数和变量、线性代数等课程。

课程结构

本书的内容适用于高年级本科生或低年级研究生，也可灵活地用于其他课程的学习。前 6 章内容适用于信号与系统课程，侧重于离散时间系统。前 11 章适用于一学期的本科生或研究生 DSP 课程，其中前 6 章用于复习，后 5 章用于强化概念和系统。全书的内容适用于高年级研究生的现代信号处理课程。

反馈

教材中肯定存在错误，在此先行向读者致歉。同时，希望读者能将错误或其他意见反馈至 vingle@ece.neu.edu。

致谢

感谢为本书提出建设性建议与意见的人员。感谢 Sidi Niu 为习题解答手册付出的努力，感谢 Phil Meyler 为我们选择剑桥大学出版社，感谢 Phil 对本书的整理工作。感谢剑桥大学的 Catherine Flack、Chris Miller 和 Richard Smith 为本书的出版所做的努力。最后，要感谢家人的理解与耐心。

Dimitris G. Manolakis

Vinay K. Ingle

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 信号	1
1.2 系统	6
1.3 模拟、数字和混合信号处理	9
1.4 数字信号处理应用	11
1.5 本书的组织方式	12
学习小结	13
复习题	14
第 2 章 离散时间信号与系统	15
2.1 离散时间信号	15
2.2 在 MATLAB 中生成和绘制信号	18
2.3 离散时间系统	20
2.4 线性时不变系统的卷积描述	25
2.5 线性时不变系统的特性	30
2.6 卷积的分析评价	34
2.7 卷积的数值计算	37
2.8 FIR 滤波器的实时实现	39
2.9 FIR 空间滤波器	40
2.10 由线性常系数差分方程描述的系统	42
2.11 连续时间 LTI 系统	47
学习小结	50
复习题	51
习题	52
第 3 章 z 变换	59
3.1 动机	59
3.2 z 变换	60
3.3 逆 z 变换	65
3.4 z 变换的性质	67
3.5 LTI 系统的系统函数	70
3.6 由线性常系数差分方程表征的 LTI 系统	72
3.7 极零点位置与时间域行为间的关系	74
3.8 单边 z 变换	77
学习小结	79

复习题	80
习题	80
第4章 信号的傅里叶表示	87
4.1 正弦信号及其特性	87
4.2 连续时间信号的傅里叶表示	92
4.3 离散时间信号的傅里叶表示	102
4.4 傅里叶级数和傅里叶变换小结	109
4.5 离散时间傅里叶变换的性质	111
学习小结	121
复习题	122
习题	123
第5章 LTI 系统的变换分析	129
5.1 LTI 系统的正弦响应	129
5.2 频率域中 LTI 系统的响应	134
5.3 信号通过 LTI 系统后的失真	137
5.4 理想和实际滤波器	141
5.5 有理系统函数的频率响应	144
5.6 频率响应对极点和零点的依赖性	148
5.7 通过配置极零点设计简单滤波器	153
5.8 幅度响应和相位响应之间的关系	158
5.9 全通系统	160
5.10 可逆性和最小相位系统	163
5.11 连续时间 LTI 系统的变换分析	166
学习小结	176
复习题	177
习题	178
第6章 连续时间信号的采样	187
6.1 连续时间信号的理想周期采样	187
6.2 由样本重建带限信号	190
6.3 欠采样的影响: 混叠	192
6.4 连续时间信号的离散时间处理	199
6.5 实际采样和重建	202
6.6 带通信号采样	209
6.7 图像采样与重建	213
学习小结	217
复习题	218
习题	219
第7章 离散傅里叶变换	226
7.1 傅里叶分析计算	226

7.2 离散傅里叶变换 (DFT)	229
7.3 离散时间傅里叶变换的采样	232
7.4 离散傅里叶变换的性质	239
7.5 使用 DFT 的线性卷积	251
7.6 使用 DFT 的信号的傅里叶分析	255
学习小结	268
复习题	269
习题	270
第 8 章 离散傅里叶变换计算	278
8.1 直接计算离散傅里叶变换	278
8.2 采用矩阵法的 FFT 思想	279
8.3 时间抽取 FFT 算法	282
8.4 频率抽取 FFT 算法	289
8.5 归纳和其他 FFT 算法	291
8.6 实际考虑	293
8.7 特定应用的 DFT 计算	295
学习小结	302
复习题	302
习题	303
第 9 章 离散时间系统的结构	310
9.1 框图和信号流图	310
9.2 IIR 系统结构	311
9.3 FIR 系统结构	320
9.4 格型结构	327
9.5 结构转换、仿真和验证	333
学习小结	334
复习题	335
习题	336
第 10 章 FIR 滤波器设计	343
10.1 滤波器设计问题	343
10.2 线性相位 FIR 滤波器	347
10.3 采用窗函数法设计 FIR 滤波器	355
10.4 采用频率采样法设计 FIR 滤波器	367
10.5 切比雪夫多项式和极小极大逼近	374
10.6 等纹波最优切比雪夫 FIR 滤波器设计	376
10.7 一些特殊 FIR 滤波器的设计	386
学习小结	392
复习题	392
习题	393

第 11 章 IIR 滤波器的设计	401
11.1 IIR 滤波器设计简介	401
11.2 连续时间低通滤波器的设计	403
11.3 连续时间滤波器到离散时间 IIR 滤波器的变换	421
11.4 低通 IIR 滤波器的设计实例	433
11.5 低通滤波器的频率变换	436
11.6 基于 MATLAB 的 IIR 滤波器设计实例	441
学习小结	445
复习题	446
习题	447
第 12 章 多速率信号处理	455
12.1 采样率转换	455
12.2 多速率系统的实现	469
12.3 多速率系统的滤波器设计	475
12.4 双通道滤波器组	482
12.5 多通道滤波器组	491
学习小结	493
复习题	494
习题	495
第 13 章 随机信号	502
13.1 概率模型和随机变量	502
13.2 联合分布随机变量	507
13.3 协方差、相关、线性估计	512
13.4 随机过程	514
13.5 一些有用的随机过程	522
学习小结	526
复习题	527
习题	528
第 14 章 随机信号处理	534
14.1 均值、方差、协方差的估计	534
14.2 平稳过程的频谱分析	537
14.3 最佳线性滤波器	553
14.4 线性预测和全极点信号建模	557
14.5 最佳正交变换	565
学习小结	569
复习题	570
习题	571

第 15 章 有限字长效应	580
15.1 数字表示	580
15.2 量化误差统计分析	584
15.3 过采样 A/D 和 D/A 转换	590
15.4 量化滤波器系数	596
15.5 有限字长对数字滤波器的影响	601
15.6 FFT 算法中的有限字长效应	610
学习小结	611
复习题	612
习题	613
参考文献	622

第1章 引言

数字信号处理应用广泛，是一门涵盖信号获取、信号表示、信号操作与信号变换的学科。本章介绍信号、系统和信号处理的概念。首先基于信号的数学和物理表示讨论信号的分类；然后重点讨论连续时间信号、离散时间信号、连续时间系统、离散时间系统，以及连续信号与离散信号间的接口系统；再后讨论模拟信号处理、数字信号处理；最后简要概述本书的内容。

学习目标

- 了解信号的概念，并解释连续时间信号、离散时间信号及数字信号的不同。
- 解释信号的物理表示影响其数学表示的方式。
- 解释连续时间系统和离散时间系统，证明模拟域和数字域之间接口系统的必要性。
- 解释模拟信号处理和数字信号处理的不同，了解数字处理相对于模拟处理的主要优点。

1.1 信号

信号定义为随时间、空间或变量而变化的物理量。信号以其变化方式来传递信息。这种信息的操作包括信号获取、存储、传输和变换。

本节中的许多信号都可用做示例，但只选择几种信号来证明后续章节中要用到的几个重要概念。时间波形如图 1.1 所示的语音信号，表示了麦克风将变化的声压转换为电信号的过程。注意，不同的声音对应着不同的时间压力变化。

为了更好地理解模拟信号处理和数字信号处理的本质，以及两者之间的差异，本书中将使用当前几乎绝迹且很多读者不太了解的模拟系统。图 1.2a 所示为记录和播放语音或音乐的磁带系统。记录过程和播放过程的步骤如下：

- 麦克风检出声波并将其转换为称为音频信号的小模拟电压。
- 模仿声波音量和频率的音频信号持续变化，放大后由记录磁头转换为磁场。
- 磁带在写磁头下方移动，记录（存储）磁场强度。
- 磁带在读磁头下方移动，磁带上的磁场转换为电信号，并应用于线性放大器。
- 放大器的输出进入扬声器，后都将放大后的音频信号转换为声波。放大器控制重新生成的声波的大小。

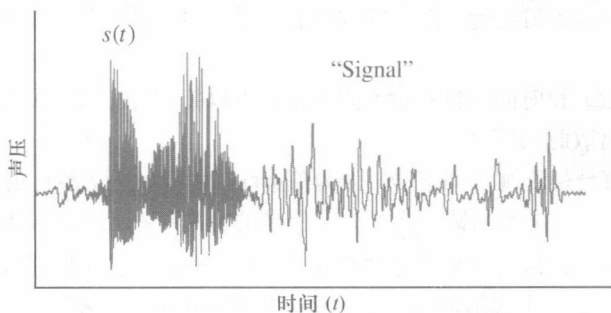


图 1.1 语音记录示例。时间波形给出单词 Signal 的声压随时间变化的函数 $s(t)$

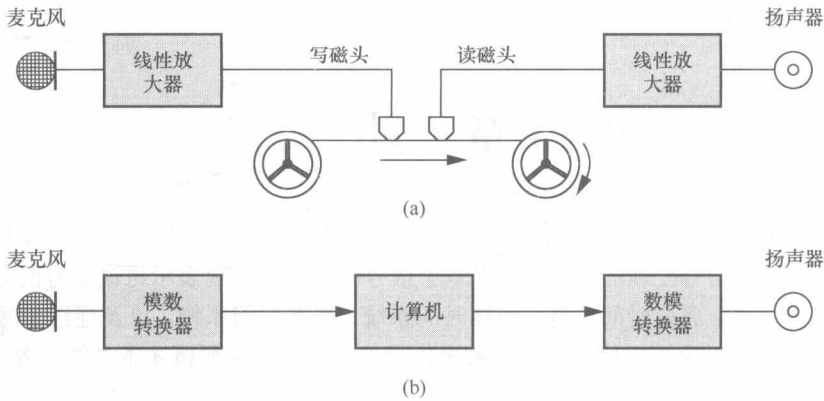


图 1.2 使用磁带的模拟音频记录系统的框图(a)和使用个人计算机的数字记录系统的框图(b)

考虑图 1.2b 所示的系统，它是个人计算机组成的一部分，系统中的声音记录和播放步骤如下：

- 麦克风把声波转换为电子音频信号。音频信号放大至可用电平后，应用于模数转换器。
- 放大的音频信号由模数转换器转换为一系列数字。
- 代表了音频信号的这些数字可通过软件存储或操作，以提高质量、减少存储空间或添加一些特效。
- 数字数据转换为模拟电信号，然后放大并送至扬声器产生声波。

模拟磁带记录仪的质量受限于记录介质，即磁带。磁带的拉伸或收缩，或驱动磁带的电动机速度的变化，都会因音频信号的时间尺度变化而导致畸变。磁场强度的变化也会导致音频信号的幅度畸变。每播放一次或每复制一次，都会损害记录的质量。相比之下，数字音频的质量由模数转换过程生成的数字的精度决定。音频信号转换为数字形式后，就可实现无差错的存储、传输和再现。Bollacker (2010)深入探讨了如何使用模拟或数字媒介来存储信息。每台个人计算机中都有一个声卡，它可用来实现图 1.2b 所示的系统。后续章节中会经常使用这个系统来说明各种信号处理技术。

1.1.1 信号的数学表示

为简化信号处理系统的分析和设计，有必要用一个或多个自变量的数学函数来表示信号。例如，图 1.1 中的语音信号数学上可由函数 $s(t)$ 来表示，它表明了声压随时间的变化。相比之下，图 1.3 中的单色图形是一个携带了信息的信号示例，其中的信息编码为亮度的空间变化。因此，它可由函数 $f(x, y)$ 表示，该函数描述了亮度随两个空间变量 x 和 y 的变化。沿水平线或垂直线取亮度值时，会分别得到包含单个自变量 x 或 y 的信号。本书主要介绍具有单个自变量的信号。为方便起见，我们把幅度称为因变量，把时间称为自变量。对于随其他自变量变化的信号，书中会调整表示方法和词汇。

根据幅度（因变量）和时间（自变量）的取值，可以把信号分成不同的类型。两个自然的类型是连续时间信号和离散时间信号。

图 1.1 中的语音信号是连续时间信号，因为值 $s(t)$ 在任意时刻 t 都有定义。用数学术语来说，我们称 $s(t)$ 是一个连续自变量的函数。连续时间信号的幅度可在连续的实数范围内取任意值。连续时间信号也称模拟信号，因为其幅度是“模拟的”（即与其表示的物理量成比例）。

太阳的年均黑子数是一个离散时间信号示例，如图 1.4 所示。离散时间信号仅在离散时间处有定义，即仅在自变量值的离散集合处有定义。实际中的大多数信号都是连续时间信号。然而，

使用数字信号处理技术时,需要离散信号表示,它通常是对连续时间信号在时间上以等间隔点的方式进行采样实现的(周期性采样)。采样结果是数字序列

$$s[n] \triangleq s(t)|_{t=nT} = s(nT) \quad (1.1)$$

式中, n 是整数 $\{\dots, -1, 0, 1, 2, 3, \dots\}$, T 是采样周期。 $F_s \triangleq 1/T$ 为采样频率或采样率,表示每秒的采样数量。连续时间信号及对其采样得到的离散信号间的关系,具有重大的理论和实际价值。要强调的是,两个采样时刻之间的离散时间信号的值并不为零,只是没有定义而已。采样也可推广到二维信号(如图像),方法是以矩形网格的方式进行。它可用公式 $s[m, n] \triangleq s(m\Delta x, n\Delta y)$ 来表示,其中 Δx 和 Δy 分别是水平和垂直采样周期。图像样本 $s[m, n]$ 称为图素或像素。

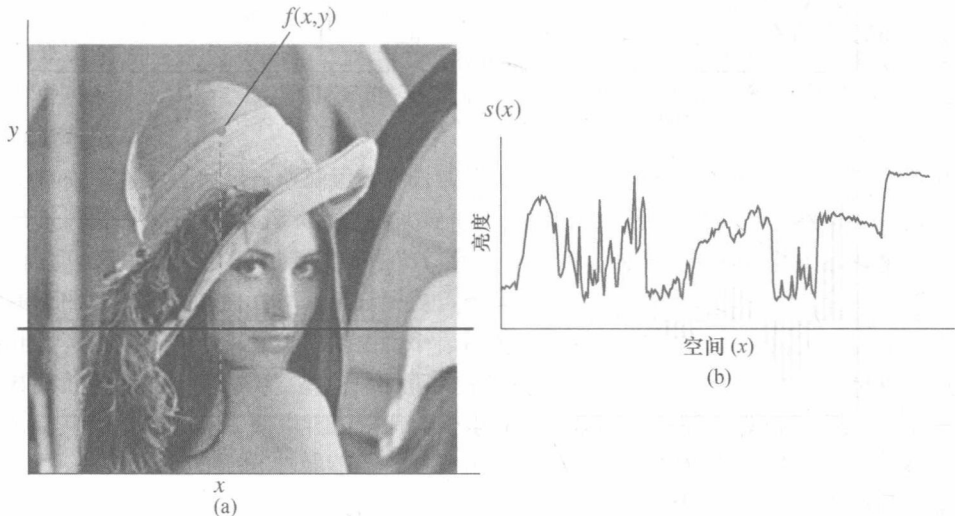


图 1.3 单色图形示例。(a)空间某点处的亮度是直角坐标 x 和 y 的标量函数 $f(x, y)$ 。
(b)水平线 $y = y_0$ 处的亮度仅是水平空间变量 x 的函数,即 $s(x) = f(x, y = y_0)$

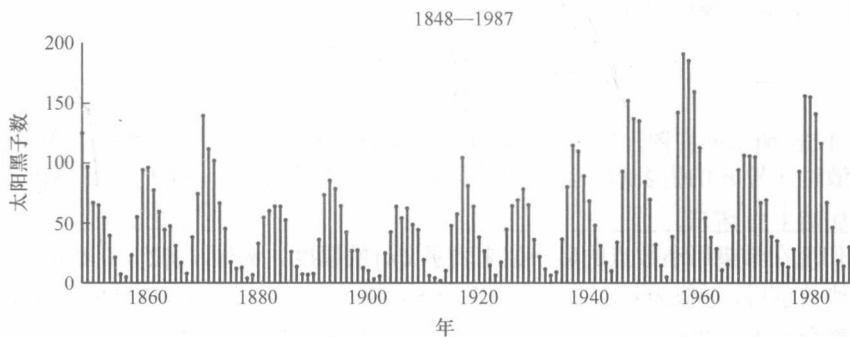


图 1.4 显示年均太阳黑子数的离散时间信号

本书中的连续自变量放在圆括号内,离散自变量放在方括号内,目的是强调圆括号内的是实数,方括号内的是整数。这样,式(1.1)中的符号就会有意义。离散时间信号 $s[n]$ 是实数序列,因此术语“离散时间信号”和“序列”可互换使用。要强调的是,离散时间信号 $s[n]$ 仅是为自变量的整数值定义的。

离散时间信号 $s[n]$ 的幅度取值于具有 K 个实数的有限集 $\{a_1, a_2, \dots, a_K\}$ 时,相应的信号称为数字信号。存储在计算机中或显示在计算机屏幕上的信号都是数字信号。

为说明不同信号类别间的差异, 考虑由下式定义的连续时间信号:

$$s(t) = \begin{cases} e^{-2t} \cos(3\pi t), & t \geq 0 \\ 0, & t < 0 \end{cases} \quad (1.2)$$

连续时间信号 $s(t)$ 的特性如图 1.5a 中的实线所示。

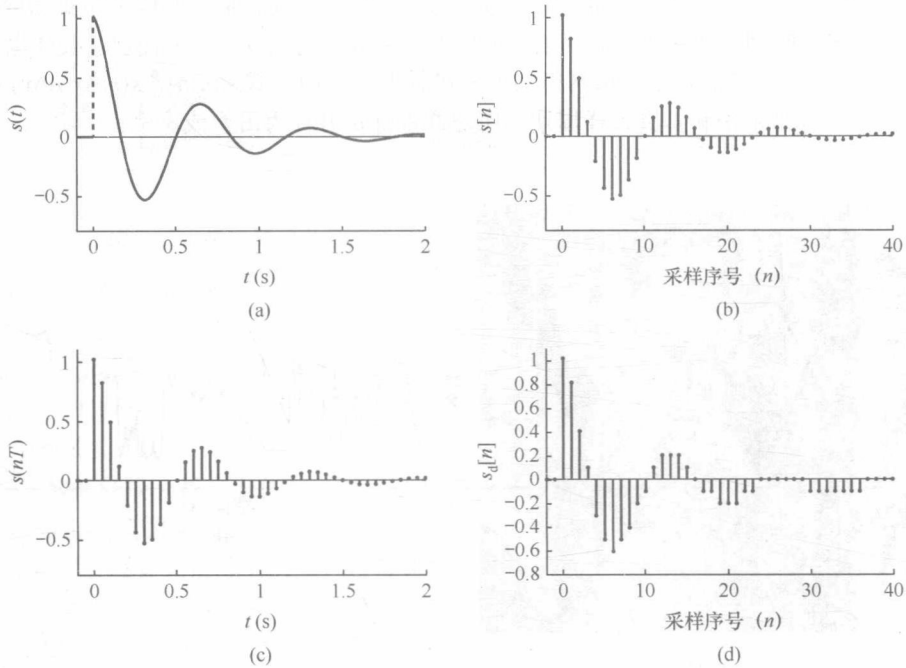


图 1.5 连续时间信号(a)、离散时间信号(b)和(c)及数字信号(d)的图形表示

要在计算机屏幕上绘出 $s(t)$, 只能计算其在有限个离散点的值。使用采样周期 $T = 0.05\text{s}$ 对信号 $s(t)$ 采样时, 得到离散时间信号

$$s[n] = s(nT) = \begin{cases} e^{-0.2n} \cos(0.3\pi n), & n \geq 0 \\ 0, & n < 0 \end{cases} \quad (1.3)$$

其图形为图 1.5b 所示的杆图。序列中的每个值都由顶端有个圆点的垂直线(杆)表示, 每个采样位置由离散时序号 n 的值表示。需要知道每个采样的精确时刻 $t = nT$ 时, 可画出 $s(nT)$ 随 t 变化的图形, 如图 1.5c 所示。

假设我们现在希望用小数点的后一位来表示 $s[n]$ 的幅度。例如, $s[2] = 0.4812$ 在舍去小数点后一位的其他数字后, 近似为 $s_d[2] = 0.4$ 。如图 1.5d 所示, 经过这种处理后形成的数字信号 $s_d[n]$, 只能从有限集合 $\{-0.6, -0.5, \dots, 1\}$ 内取值, 这个集合中包含 17 个信号幅度值。经过计算机处理的所有信号, 都是数字信号, 因为其幅度由有限精度的定点数或浮点数表征。

1.1.2 信号的物理表示

在存储、传输和处理信号时, 要用到其物理表示。物理量的表示方法有两种, 即模拟和数字:

1. 在模拟表示中, 一个量由与其值成比例的电压或电流表示。模拟量的关键特性是, 它们可在整个连续的值域内变化。
2. 在数字表示中, 一个量不由与其值成比例的电压或电流表示, 而由对应于二进制数字的

开/关脉冲表示。例如，类似于 $b_1b_2 \cdots b_{B-1}b_B$ 的比特流 [其中 B 个二进制数字 (比特) 取值 $b_i = 0$ 或 $b_i = 1$] 可将一个二进制整数的值表示为

$$D = b_12^{B-1} + b_22^{B-2} + \cdots + b_{B-1}2^1 + b_B2^0 \quad (1.4)$$

或将一个 B 位小数表示为

$$D = b_12^{-1} + b_22^{-2} + \cdots + b_{B-1}2^{-(B-1)} + b_B2^{-B} \quad (1.5)$$

模拟信号的物理表示要求使用存储媒介的物理特性来产生两个“连续模拟量”：一个表示信号幅度，另一个表示时间。例如，在模拟磁带记录系统中，时间由沿磁带逐渐增大的线性距离来表示，原始信号的幅度由磁带的磁场来表示。实际上，所有模拟物理表示方法都存在两类问题：影响“模拟时间”的问题（如驱动磁带的电动机的变化）和影响“模拟幅度”的问题（如磁带磁场的变化）。模拟的含义为“连续”，因为其幅度能连续变化或以无穷小的间隔变化。理论上，模拟信号的分辨率是无限的，即模拟信号能够表示无限个值。然而，由于噪声的影响，模拟信号的精度和分辨率是有限的。

二进制数字可由任何只有两种运行状态或物理状态的物理设备来表示。满足这一条件的设备很多：开关（通或断）、二极管（导电或非导电）、晶体管（截止或饱和）、磁盘上的点（磁化或消磁）。例如，在光盘上，二进制数据在塑料基片上以凹坑的形式编码，其上涂有铝膜反射层。激光束跟踪凹坑的同心圆曲线时，就会检测到数据。

在电子数字系统中，二进制信息由两个标称电压（或电流）表示，如图 1.6 所示。表示二进制数 1 和 0 的精确电压值并不重要，只要其在规定范围内即可。在数字信号中，电压或电流电平不再表示一个变量的大小，因为它们只有两个电平。相反，变量的大小由几个开/关电平的组合来表示，要么同时出现在不同的线路上（并行传输），要么按时间顺序出现在一条线路上（串行传输）。因此，数字信号的数值个数有限，且只能以离散步长来改变数值。每个值具有足够的位数时，数字信号就能提供任意精度。

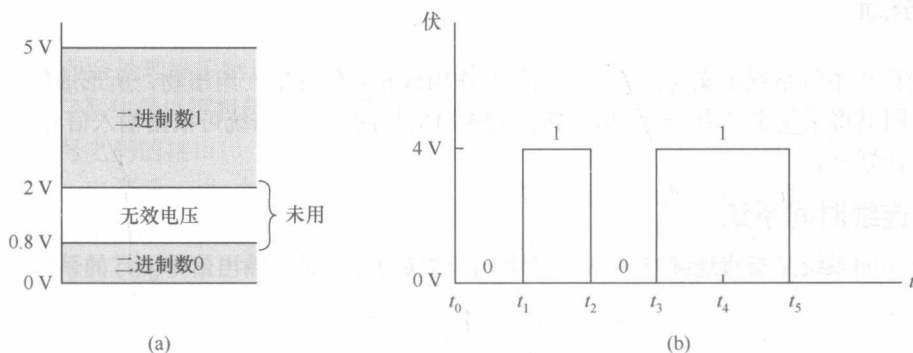


图 1.6 数字信号和时序图。(a)数字系统中的典型电压分配；(b)典型数字信号时序图

在模拟系统中，电压的精确值很重要，因为它表示电压的大小。因此，模拟信号对噪声（随机波动）更为敏感。相比之下，数字表示中的数据值一旦确定，就可无损地进行复制、存储、再现和修改。例如，复制的磁带和复制的光盘，其质量明显不同。

我们处理的数字信号及用来操作这些数字信号的程序，都以比特序列存储在计算机的内存中。典型计算机内存段的内容看起来可能如下：

...0110100111101000010010111101010101110...

这种比特集合没有结构。让比特流变得有意义的第一步是，以字节或字来考虑比特。一般而言，

1 字节由 8 个比特组成, 1 个字由 16 比特或 32 比特组成。内存的组织方式允许我们按字节或字的方式访问特定地址处的内容。然而, 我们仍未清楚地说明字节或字的内容的意义。要为某个字节赋予数值意义, 必须知道所表示数值的类型。例如, 字节“00110101”作为整数对待时, 其值为 53, 作为小数对待时其值为 0.2070。不同的计算机语言, 有着不同类型的整数和浮点数表示。第 15 章将探讨不同类型的数字表示及其性质。本书中使用术语“二进制码”来表示字节或字的内容。

1.1.3 确定性信号与随机信号

连续时间信号和离散时间信号之间的差异, 在用于表示和分析的数学工具中意义重大。然而, 更为深远的影响源于确定性信号和随机信号之间的差异。确定性信号的行为完全可以预测, 而随机信号的行为则具有一些不确性。要使这种区别更为精确, 就需要知道一个信号过去至当前的所有值。能利用信号过去的值精确地预测未来的值时, 称该信号为确定性信号; 反之, 不能利用信号过去的值精确预测未来的值时, 称其为随机信号。实际上, 这两类信号的差别并不十分明显, 因为它们都会受到随机噪声的干扰。然而, 在研究信号的数学表示时, 将信号分为随机信号和确定性信号已被人们广泛接受。

至少在原理上, 确定性信号可由数学函数来描述。这些函数通常采用显式数学公式的形式, 如图 1.5 中的信号。然而, 也存在不能由简单公式描述的确定性信号。原理上, 我们假设每个确定性信号均可由函数 $s(t)$ 来描述, 即使显式数学公式不存在。相比之下, 随机信号无法由数学函数来描述, 因为它们的未来值是未知的。因此, 表示和分析随机信号的数学工具, 不同于表示和分析确定性信号的数学工具。更为特别的是, 随机信号要使用概率论和数理统计的概念与技术来研究。本书主要介绍确定性信号的处理, 第 13 章和第 14 章将简要介绍随机信号的数学描述与分析。

1.2 系统

韦氏词典中将系统定义为: 有规律地相互作用或相互依存的一组事物, 所形成的统一整体。信号处理图书将系统定义为: 输入信号转换为输出信号的过程。系统可根据输入信号和输出信号的类型进行划分。

1.2.1 连续时间系统

连续时间系统是指将连续时间输入信号 $x(t)$ 转换为连续时间输出信号 $y(t)$ 的系统。例如,

$$y(t) = \int_{-\infty}^t x(\tau) d\tau \quad (1.6)$$

描述的连续时间系统, 产生一个输出信号, 它是输入信号从初始时刻 $t = -\infty$ 到当前时刻 t 的积分。用数学符号表示时, 连续时间系统的输入-输出关系为

$$x(t) \xrightarrow{\mathcal{H}} y(t) \text{ 或 } y(t) = \mathcal{H}\{x(t)\} \quad (1.7)$$

式中, \mathcal{H} 表示表征该系统的数学运算符。连续时间系统的图形表示如图 1.7a 所示。

连续时间系统物理实现时, 采用模拟电子电路, 如电阻、电容、电感和运算放大器等。连续时间系统的物理实现称为模拟系统。常见的模拟系统有音频放大器、调频/调幅收音机、磁带记录和播放系统。