



普通高等教育“十一五”国家级规划教材



数字信号处理 第3版

姚天任 江太辉

华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>

策划编辑 周芬娜
责任编辑 周芬娜
封面设计 潘 群



ISBN 978-7-5609-2284-3



9 787560 922843

01 >



定价:43.00 元

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

数字信号处理

(第3版)

姚天任 江太辉

华中科技大学出版社
中国·武汉

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理(第3版)/姚天任 江太辉. —武汉:华中科技大学出版社,2007年8月
ISBN 978-7-5609-2284-3

I. 数… I. ①姚… ②江… II. 数字信号-信号处理-高等学校-教材
IV. TN911.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第105623号

数字信号处理(第3版)

姚天任 江太辉

责任编辑:周芬娜

封面设计:潘群

责任校对:陈骏

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录排:武汉佳年华科技有限公司

印刷:湖北恒泰印务有限公司

开本:710mm×1000mm 1/16

印张:29.25

字数:539 000

版次:2007年8月第3版

印次:2007年8月第17次印刷

定价:43.00元

ISBN 978-7-5609-2284-3/TN·57

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

内 容 提 要

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,是在第2版的基础上修订完成的。

本书系统和全面地讨论了数字信号处理的基本理论、概念和方法。第1章综述了数字信号处理学科的主要内容、应用领域和发展历史;第2章介绍了离散时间信号和系统的基础理论和基本分析方法;第3章介绍了离散傅里叶变换及其快速计算方法;第4章介绍了无限和有限冲激响应数字滤波器的原理和设计方法;第5章介绍了离散时间随机信号及其通过线性移不变系统的分析方法和特性;第6章讨论了数字信号处理实现中的有限字长效应问题;第7章介绍了功率谱估计的经典方法即周期图方法。以上各部分内容中都包括了用 Matlab 解决数字信号处理实际问题的方法介绍。全书有丰富的例题(共119题)、复习思考题(共110题)和习题(共177题)。书末附有部分习题的参考答案。本书可作为高等学校电子信息工程、通信工程、自动化、电子科学与技术、测控技术与仪器、生物医学工程、计算机、雷达、声纳等工科专业以及理科电子信息科学与技术专业的教材,也可作为从事这些专业的工程技术人员和科学研究人员的参考书。

第 3 版前言

众所周知,信号是信息的表现形式,或者说信号中携带着信息。信号处理的目的是为了有效和以尽可能小的失真传输和利用信息。20 世纪 90 年代以来,全球通信发展的现状表明,信号的数字传输和数字处理,已经成为声音、图像、视频和数据通信的最主要的手段,目前这一发展趋势尤其明显。形成这一局面的主要原因,是信号的数字传输和数字处理相对于模拟信号具有许多优点,其中,最突出的优点包括:它具有很大的灵活性和广泛的适应性,具有很高的可靠性,适合于通过加密获得高安全性,具有很高的性能价格比。

随着信息科学技术的发展,特别是随着数字信号处理技术的应用领域变得越来越广泛和深入,数字信号处理学科的重要性,无论从理论还是从实际应用的角度,都越来越被人们所认识。作为高等学校理工科专业的一门重要理论和技术基础课,数字信号处理课程自然地受到了普遍重视,其中的一个突出表现便是近年来国内外出版了不少这方面的教材和参考书。

从本书第 2 版出版以来,数字信号处理学科的发展非常迅速,它在多速率滤波和滤波器组、自适应滤波器、时频分析和非线性信号处理等学科分支的技术成就都获得了广泛应用。但是,对于信息与通信工程等专业的大学本科生来说,为他们打下坚实的理论基础,仍然是学习数字信号处理课程最重要的目标。因此,本书第 3 版的内容仍然把重点放在以下三个方面:第一,离散时间确定信号的时域和频域分析,离散时间随机信号的描述及其通过线性移不变系统的分析;第二,线性数字滤波器的设计和 FFT 的计算技术;第三,数字信号处理实现中的有限字长效应分析方法和功率谱估计的经典方法。

本书第 3 版相对于第 2 版增加了以下新内容:用 Matlab 产生离散时间信号和用 Matlab 对离散时间信号进行运算;全通系统和最小相位系统,相延迟和群延迟的概念;Matlab 在离散时间信号和系统分析中的应用;离散傅里叶变换及其应用的 Matlab 实现方法;利用 Matlab 设计无限冲激响应和有限冲激响应数字滤波器;离散时间随机信号及其通过线性移不变系统的 Matlab 分析方法;用 Matlab 分析有限字长效

应等。此外,增加了一些例题、复习思考题和习题,使它们分别达到 119 题、110 题和 177 题。绪论部分对数字信号处理学科的发展历史进行了补充。全书的文字也重新进行了修订。

本书参考学时数为 54~60 学时,部分教学内容可安排在 Matlab 习题中完成。

本书是第三版,经多次修订增补,但仍会有不足甚至谬误之处,尚望读者和同行不吝指正。对本书的意见和建议请向出版社或作者本人反映。

作者

2007 年 2 月于华中科技大学

第2版前言

本教材第2版系按原电子工业部的《1996—2000年全国电子信息类专业教材编审出版规划》，由全国电子工程专业教学指导委员会编审、推荐出版。本教材由华中理工大学姚天任教授担任主编，西北工业大学赵荣椿教授任主审，北京理工大学梅文博教授任责任编委。

数字信号处理是信息和通信工程各专业的一门技术基础课，也是通信和信息系统、信号和信息处理等专业研究生的入学考试科目之一。多年来，国内外不少专家、学者一直强调，为了使高等学校的毕业生适应信息社会对他们提出的新要求，所有理工科专业和部分经济管理类专业，都很有必要把数字信号处理作为一门必修的技术基础课来设置。本教材的参考学时数为54学时。学习这门课程之前，学生应修过“信号与线性系统”和“复变函数”等课程。学好这门课程可为进一步学习“现代数字信号处理”、“数字语音处理”和“数字图像处理”等研究生课程打下初步的基础。

数字信号处理是一门理论和技术都发展十分迅速、应用非常广泛的交叉和前沿性学科，它的理论性和实践性都很强。因此，在教学过程中要特别强调基本理论、基本概念和基本方法的掌握。为加深对基本理论的理解和对基本方法的掌握，书中安排了一定数量的复习思考题和练习题，书末附有习题参考答案和一些算法的计算机程序。如有条件，最好能安排适当数量的实验和简单的工程设计练习。

本教材第2版与第1版比较，全书的总体结构没有很大变化，但所有章节的内容都是重新编写的。具体地说，第1章是绪论，综述了数字信号处理学科的内容、应用领域和发展方向；第2章介绍了离散时间信号和离散时间系统的基本理论和基本分析方法，本章内容是全书的基础；第3章和第4章分别讨论了离散傅里叶变换的快速算法和数字滤波器的设计原理，这是数字信号处理学科中两个最基本和最重要的问题；第5章介绍了离散时间随机信号的基本概念，这些概念是学习下两章内容和以后学习研究生课程的重要基础；第6章和第7章分别讨论有限字长效应的分析方法和功率谱的经典估计方法，这两部分内容涉及数字信号处理理论和技术的工程实现以及应用中的具体问题。

本教材第2版中新加入了部分内容，如第2章中增加了关于离散时间信号的取

样、抽取和内插的讨论,第3章中增加了对 N 为合数的FFT算法的介绍,第6章对极限环振荡和死带效应进行了更深入的讨论。此外,第5章和第7章是参照国务院学位委员会编的《同等学力人员申请硕士学位信息与通信工程学科综合水平全国统一考试大纲及指南》的要求编写的。

本教材第1章和第5至第7章由姚天任教授执笔,第2至第4章由江太辉教授执笔。

限于编著者的水平,不妥和错误之处一定不少,切盼读者将所发现的问题和对本书的意见径寄作者或寄华中理工大学出版社。

作者

1999年8月于华中理工大学

第 1 版前言

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和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 1 章至第 3 章由江太辉执笔,第 4 章至第 6 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

第 1 章 绪论	(1)
1.1 数字信号处理学科内容	(1)
1.2 数字信号处理的应用领域	(2)
1.3 数字信号处理学科的发展历史	(4)
1.4 数字信号处理的基本运算	(7)
1.5 本书内容安排	(9)
参考文献	(10)
第 2 章 离散时间信号和离散时间系统	(12)
2.1 概述	(12)
2.2 离散时间信号——数字序列	(13)
2.2.1 离散时间信号的表示和基本形式	(13)
2.2.2 使用 Matlab 产生离散时间信号及其运算	(17)
2.3 离散时间系统	(20)
2.3.1 线性非移变系统	(20)
2.3.2 系统的稳定性和因果性	(28)
2.3.3 线性常系数差分方程	(30)
2.4 离散时间信号和系统的频域描述	(34)
2.4.1 离散时间信号的傅里叶变换(DTFT)	(34)
2.4.2 离散时间信号的傅里叶变换的性质	(36)
2.4.3 离散时间系统的频率响应	(40)
2.5 信号的取样	(41)
2.5.1 连续时间信号的取样	(41)
2.5.2 离散时间信号的取样	(46)
2.5.3 离散时间信号的抽取和内插	(49)
2.6 z 变换	(51)
2.6.1 z 变换的定义	(51)
2.6.2 几种序列的 z 变换及其收敛域	(53)

2.6.3 z 变换的逆变换	(57)
2.6.4 z 变换的性质和定理	(64)
2.6.5 z 变换与拉普拉斯变换的关系	(70)
2.7 系统函数	(72)
2.8 全通系统与最小相位系统	(76)
2.8.1 全通系统	(76)
2.8.2 最小相位系统	(77)
2.8.3 相位延迟和群延迟	(78)
2.9 Matlab 在离散时间信号和系统分析中的应用	(79)
2.9.1 系统时域响应的计算	(79)
2.9.2 计算离散时间信号的傅里叶变换和系统频率响应	(82)
2.9.3 部分分式法求逆 z 变换的 Matlab 实现	(84)
复习思考题	(86)
习题	(87)
参考文献	(94)
第 3 章 离散傅里叶变换及其快速算法	(95)
3.1 离散傅里叶级数及其性质	(95)
3.1.1 离散傅里叶级数(DFS)	(95)
3.1.2 离散傅里叶级数的性质	(97)
3.2 离散傅里叶变换及其性质	(99)
3.2.1 离散傅里叶变换(DFT)	(99)
3.2.2 离散傅里叶变换的性质	(102)
3.3 利用循环卷积计算线性卷积	(108)
3.4 频率取样	(110)
3.5 快速傅里叶变换	(112)
3.5.1 离散傅里叶变换的计算量	(112)
3.5.2 时间抽选基 2 FFT 算法(库里-图基算法)	(114)
3.5.3 蝶形、同址和变址计算	(118)
3.5.4 频率抽选基 2 FFT 算法	(122)
3.5.5 IFFT 的计算方法	(125)
3.6 N 为合数的 FFT 算法	(126)
3.7 利用 FFT 计算线性卷积	(129)
3.8 分段卷积	(130)
3.9 线性调频 z 变换	(134)

3.10 离散傅里叶变换及其应用的 Matlab 实现	(138)
3.10.1 离散傅里叶变换、循环移位和循环卷积的 Matlab 实现	(138)
3.10.2 使用 FFT 进行信号谱分析的 Matlab 实现	(145)
3.10.3 利用 FFT 计算线性卷积的 Matlab 实现	(151)
复习思考题	(154)
习题	(155)
参考文献	(159)
第 4 章 数字滤波器的原理和设计方法	(160)
4.1 概述	(160)
4.2 无限冲激响应(IIR)数字滤波器的基本网络结构	(161)
4.3 有限冲激响应(FIR)数字滤波器的基本网络结构	(166)
4.4 IIR 数字滤波器的设计方法	(173)
4.4.1 冲激响应不变法	(174)
4.4.2 双线性变换法	(177)
4.4.3 数字巴特沃斯滤波器	(179)
4.4.4 利用 Matlab 设计数字巴特沃斯滤波器	(185)
4.4.5 数字切比雪夫滤波器	(195)
4.4.6 利用 Matlab 设计切比雪夫滤波器	(201)
4.4.7 椭圆函数滤波器	(212)
4.5 IIR 数字滤波器的频率变换	(217)
4.6 FIR 数字滤波器的设计方法	(223)
4.6.1 窗函数法	(224)
4.6.2 频率取样法	(237)
4.7 FIR 数字滤波器与 IIR 数字滤波器的比较	(242)
复习思考题	(242)
习题	(243)
参考文献	(248)
第 5 章 离散时间随机信号	(249)
5.1 概述	(249)
5.2 随机变量的描述	(250)
5.3 离散随机过程	(256)
5.4 时间平均	(259)
5.5 相关序列和协方差序列的性质	(261)
5.6 功率谱	(264)

5.7 离散随机信号通过线性非移变系统	(268)
5.8 离散随机信号的 Matlab 分析	(274)
5.8.1 用 Matlab 产生随机信号	(274)
5.8.2 离散时间随机信号的 Matlab 分析	(279)
5.8.3 离散随机信号通过线性移不变系统的 Matlab 分析	(285)
复习思考题	(290)
习题	(291)
参考文献	(296)
第 6 章 数字信号处理中的有限字长效应分析	(297)
6.1 有限字长效应引起的误差	(297)
6.2 二进制数的表示和运算方法及其与量化误差的关系	(301)
6.2.1 定点运算和浮点运算	(301)
6.2.2 原码、补码和反码	(303)
6.2.3 截尾误差和舍入误差	(306)
6.3 信号的量化噪声	(309)
6.4 数字滤波器系数量化的误差分析	(312)
6.4.1 系数量化误差对滤波器稳定性的影响	(313)
6.4.2 系数量化误差对滤波器零点和极点位置的影响	(314)
6.4.3 滤波器频率特性误差的估计	(316)
6.5 有限字长定点运算 IIR 滤波器的输出噪声	(317)
6.6 有限字长定点运算 IIR 滤波器的极限环振荡和死带效应	(323)
6.6.1 极限环振荡	(323)
6.6.2 死带效应	(326)
6.6.3 零输入极限环的边界	(330)
6.7 定点运算 FIR 滤波器和 FFT 算法的误差分析	(335)
6.7.1 定点运算 FIR 数字滤波器	(335)
6.7.2 定点运算 FFT 算法	(337)
6.8 定点运算数字滤波器和 FFT 算法中的溢出问题	(339)
6.9 浮点运算数字滤波器和 FFT 算法中的有限字长效应	(343)
6.9.1 浮点运算 IIR 数字滤波器	(344)
6.9.2 浮点运算 FIR 数字滤波器	(346)
6.9.3 浮点运算 FFT 算法	(349)
6.10 用 Matlab 分析有限字长效应	(351)
6.10.1 Matlab 表数的精度和动态范围	(351)

6.10.2	Matlab 中的截尾和舍入量化	(352)
6.10.3	用 Matlab 分析直接型结构 IIR 滤波器系数 的有限字长效应	(353)
6.10.4	用 Matlab 分析级联型结构 IIR 滤波器系数 的有限字长效应	(356)
6.10.5	用 Matlab 分析直接型结构 FIR 滤波器系数 的有限字长效应	(359)
6.10.6	零输入极限环振荡的 Matlab 模拟	(361)
	复习思考题	(364)
	习题	(365)
	参考文献	(368)
第 7 章	功率谱估计的经典方法	(369)
7.1	概述	(369)
7.2	估计理论中的几个基本概念	(371)
7.2.1	评价估计质量的几个参数	(371)
7.2.2	最大似然估计	(373)
7.3	自相关序列的估计	(377)
7.3.1	随机过程遍历性的进一步讨论	(378)
7.3.2	自相关序列的无偏估计	(383)
7.3.3	自相关序列的有偏估计	(386)
7.4	周期图及其估计质量	(387)
7.4.1	周期图的定义	(387)
7.4.2	周期图的带通滤波器组解释	(389)
7.4.3	周期图的估计质量	(391)
7.4.4	周期图的随机起伏	(400)
7.4.5	自相关的无偏估计的傅里叶变换	(401)
7.5	改善周期图质量的方法	(401)
7.5.1	修正周期图法:数据加窗	(402)
7.5.2	Bartlett 法:周期图的平均	(406)
7.5.3	Welch 法:修正周期图的平均	(410)
7.5.4	Blackman-Tukey 法:周期图的加窗平滑	(412)
7.5.5	各种周期图计算方法的比较	(415)
7.6	Matlab 在周期图计算中的应用	(418)
7.6.1	周期图	(418)

7.6.2 修正周期图	(419)
7.6.3 Bartlett 周期图	(420)
7.6.4 Welch 周期图	(420)
7.6.5 Blackman-Tukey 周期图	(421)
7.6.6 实例	(423)
复习思考题	(425)
习题	(425)
参考文献	(428)
附录 A 频率抽选基 2 FFT 和 IFFT 子程序	(429)
附录 B 部分习题参考答案	(435)

第1章 绪 论

本章具有综述和概论的性质,内容比较广泛但不深入。它的内容与本书以下各章所讨论的内容有密切的关系但却在某些方面超越了本书的讨论范围。具体来说,本章是从数字信号处理整个学科领域的广度来介绍该学科的概貌,包括学科范围、发展历史和动态、实现方法和应用领域,而本书的内容仅涉及数字信号处理学科中的基础知识。学习这些基础知识,是进入数字信号处理学科领域的第一步。

1.1 数字信号处理学科内容

信息科学是研究信息的获取、传输、处理和利用的一门科学。信息要用一定形式的信号来表示,才能被传输、处理、存储、显示和利用,可以说,信号是信息的表现形式,而信息则是信号所具有的具体内容。

数字化、网络化和智能化是当代信息技术发展的大趋势,而数字化是网络化和智能化的基础。实际生活中遇到的信号多种多样,例如,广播信号、电视信号、雷达信号、通信信号、导航信号、射电天文信号、生物医学信号、控制信号、气象信号、地震勘探信号、机械振动信号、遥感遥测信号,等等。上述这些信号大部分是模拟信号,只有小部分是数字信号。模拟信号是自变量的连续函数,自变量可以是一维的,也可以是二维或多维的。大多数情况下,一维模拟信号的自变量是时间,经过时间上的离散化(取样)和幅度上的离散化(量化),这类模拟信号便成为一维数字信号。因此,数字信号实际上是用数字序列表示的信号。模拟语音信号经取样和量化后,得到的数字信号是一个一维离散时间序列;而图像信号经取样和量化后,得到的数字信号是一个二维离散空间序列。本书只讨论一维数字信号的处理问题。

数字信号处理,就是用数值计算方法对数字序列进行各种处理,把信号变换成符合需要的某种形式。例如,对数字信号进行滤波以限制它的频带或滤除噪声和干扰,或将信号进行分离;对信号进行频谱分析或功率谱分析以了解信号中的频谱组成,进而对信号进行识别和利用;对信号进行某种变换,使之更适合于传输、存储和应用;对信号进行编码以压缩数据或提高抗干扰能力,等等。

数字信号处理学科的内容非常广泛,主要是因为它有着非常广泛的应用领域。不同的应用领域对数字信号处理学科提出了各种不同的具体要求,即使是对同一应