



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电子信息类精品教材

数字信号处理

——原理、实现及应用(第3版)

*Digital Signal Processing:
Principles, Implementations and Applications*

• 高西全 丁玉美 阔永红 编著



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>

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电子信息类精品教材

数字信号处理

——原理、实现及应用

(第3版)

高西全 丁玉美 阔永红 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本书系统讲述数字信号处理的基本原理、算法及其实现方法。主要讲述时域离散信号与系统的基本概念和时域、频域的分析方法。重点介绍信号相关性的基本概念和信号相关函数及其应用、离散傅里叶变换及其快速算法、数字滤波的基本概念与理论、数字滤波器的设计与实现方法。介绍模拟信号数字处理原理与方法、多采样率数字信号处理的基本理论和高效实现方法，数字信号处理的典型应用。

结合各章的内容，介绍相应的 MATLAB 信号处理工具箱函数，并给出用 MATLAB 阐述问题和求解计算问题的程序。各章中安排了丰富的例题、习题和上机题。

本书适合作为高等学校电子信息类专业和相近专业本科生教材，也可以作为相关专业科技人员的参考书。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有，侵权必究。

图书在版编目 (CIP) 数据

数字信号处理：原理、实现及应用/高西全，丁玉美等编著. —3 版. —北京：电子工业出版社，2016.7

电子信息类精品教材

ISBN 978-7-121-28948-4

I. ①数… II. ①高… ②丁… 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 (2016) 第 120414 号

责任编辑：韩同平 特约编辑：邹凤麒 王 博 段丹辉

印 刷：三河市华成印务有限公司

装 订：三河市华成印务有限公司

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：787×1092 1/16 印张：19.25 字数：550 千字

版 次：2006 年 7 月第 1 版

2016 年 7 月第 3 版

印 次：2016 年 7 月第 1 次印刷

定 价：45.00 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 zltz@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：88254113。

第 3 版前言

本教材第 1 版和第 2 版分别于 2006 年和 2010 年出版以后,承蒙广大师生的厚爱,被国内数十所高等学校选用,使用效果良好。第 2 版为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

相比第 2 版,第 3 版总体结构变化不大,仍然保持第 2 版的基本内容、体例结构和编写风格;根据学科发展和数字信号处理的实际应用需求,并参考国内外近期出版的同类新教材,调整或重新编写部分章节,对原来叙述不完备或疏漏之处进行了补充。具体修订内容如下:

1. 考虑到信号处理和检测领域中,相关检测已经发展成一个独立的分支,已经引起人们的广泛关注,重新编写了第 5 章,详细叙述了确定性信号的相关函数的基本概念、定义、计算和工程应用举例,并简要介绍了能量谱和功率谱的概念。使学生建立信号相关性的基本概念,了解相关检测的基本原理及其应用领域。

2. 删除了第 5 章中简单滤波器设计、数字谐振器和数字陷波器等内容;将第 5 章中的全通滤波器、最小相位系统、梳状滤波器和正弦波发生器等内容,移到第 2 章,作为时域离散系统频域分析的举例,使学生巩固频域分析概念,了解频域分析的特点和实例;将与滤波器分析及设计相关的数字滤波器的基本概念、理想滤波器和滤波器的分类移到第 6 章,使滤波器设计的叙述更加紧凑。

3. 正弦信号不管是在理论研究还是在实际信号处理的应用中,都是非常重要的。但正弦信号又有其特殊性,如果以奈奎斯特采样频率对其采样,则有可能丢失信息。第 3 版的 4.2.1 节补充了正弦信号采样的内容。

为了使读者通过解答习题和上机实验题对本课程的基本理论和基本方法加深理解,掌握数字信号处理课程的主要内容,作者精心选取了大量的习题和上机题(加“*”号)。为了便于教师授课,便于读者自学,并能自我检测学习效果,作者以电子版形式免费提供:(1)本书完整的程序集、习题解答、上机题求解程序及其运行结果;(2)四份自测题及其解答;(3)五份重点大学硕士研究生入学考试题及其解答。希望读者能正确使用这些学习资料,使其真正成为帮助广大读者学好数字信号处理课程的正能量。建议读者学习过程中最好先独立做习题,然后再对照习题解答检查。以上资料最好由任课教师通过电子邮件向本书作者索取。

本书的先修课程是工程数学、信号与系统、数字电路、微机原理和 MATLAB 语言等。本书参考教学时数为 60 课时。如果在信号与系统课程中已讲授本书第 1 章和第 2 章的内容,则教学时数可减少到 46 课时。第 9 章中多相滤波器结构和采样率转换系统的多级实现较难讲解,如果课时数紧张可以不讲,但要向学生说明这两种实现结构在实际中的重要性。对大专学生,可以只讲前 8 章,参考学时数为 60 学时。

本书在编写构思和选材过程中,参考了书后所列参考文献的一些编写思想,采用了其中一些内容、例题和习题,在此向这些教材的作者们表示诚挚的感谢!

作者电子邮件地址: xqgao@mail.xidian.edu.cn

编著者
于西安电子科技大学

第 2 版前言

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。

本教材第 1 版于 2006 年出版以后,被国内数十所大学选用,使用效果良好。

本教材特点为:

1. 突出基本原理、基本概念和基本分析方法,选材精炼。
2. 分析叙述问题条理清楚,深入浅出,逻辑性强。
3. 将数字信号处理的基础理论与 MATLAB 相结合,以基本理论为主线,以 MATLAB 为学习理论的工具。既避免了将数字信号处理教材写成 MATLAB 编程教材的喧宾夺主现象,又能使读者利用风靡世界的 MATLAB 进行高效的上机实验、设计与仿真,便于教学和自学。
4. 例题、习题与上机题多。
5. 适当补充新内容和新分析方法,以体现教材的先进性。

这次修订的宗旨是:①保持第 1 版的基本内容、体例结构和编写风格的相对稳定性;②根据教学过程中反馈意见,修订个别叙述不严谨之处,或者原理性错误;③根据学科发展,调整或重新编写部分内容。

修订后的教材更加突出严谨性、先进性和教学适用性。

(1) 将第 1 版中 4.2.1 节和 4.2.2 节合并,使叙述更加紧凑,逻辑更加合理。

(2) 更正了第 1 版中 6.1.8 节存在的错误。通过低通到高通、带通及带阻滤波器的频率变换公式、幅频特性曲线和频率映射关系曲线,清楚地描述了频率变换的概念和高通、带通及带阻滤波器的设计方法和步骤,便于教师讲解,有利于学生理解和掌握。

(3) 9.5.2 节介绍多相滤波器结构。第 1 版中,根据转置关系,由内插器的多相滤波器结构,直接得出抽取系统的多相滤波器结构。本次修订,增加了验证举例,通过比较抽取器基本原理框图和多相滤波器结构的输出信号,验证了抽取系统的多相滤波器结构的正确性,加深学生对该内容的理解。

本书第 1,2,4,5,8 章由丁玉美编写,第 10 章由丁玉美和阔永红共同编写,其余各章由高西全编写。

本书在编写构思和选材过程中,参考了书后所列参考文献的一些编写思想,采用了其中一些内容、例题和习题,在此向这些教材的作者们表示诚挚的感谢!

由于作者水平所限,书中难免有不足和错误,欢迎广大读者指正。欢迎读者反馈宝贵建议和意见,交流教学体会和经验,以便不断修正错误,去粗取精,使本教材进一步完善和提高。

编著者

于西安电子科技大学

第 1 版前言

随着信息科学和计算技术的迅速发展,数字信号处理的理论与应用得到飞跃式发展,形成一门极其重要的学科。数字信号处理也已经成为大专院校相关专业的一门必修课程。对该课程的教材和参考书也应该随科技形势的发展不断地从教学内容、教学方法上进行改进。

1994 年我们根据无线电技术与信息系统教材编审委员会制定的教学大纲编写出版了全国统编教材《数字信号处理》,2001 年编写并出版该书的第 2 版,其主要特点是满足普通大学教学大纲要求,选材少而精,并配有成熟的实验与习题,是一本适合教与学的较好教材,销售量已近 20 万册。2002 年 9 月获第五届全国高校出版社优秀畅销书一等奖。2005 年获陕西省高等院校优秀教材一等奖。

为了适应数字信号处理新理论与新技术的发展,满足教学的需要,打破原教材的格局,重新编写的这本新教材主要有以下特点:

(1) 突出基本原理、基本概念与基本分析方法,选材精练。

随着科学技术的发展,数字信号处理的新内容很多,但限于篇幅和教学大纲的要求,以及学时所限,教材选材必须少而精。只能选择理论成熟并有较强的实用价值的内容,且仍然要以讲授基本原理、基本概念和基本分析方法为重点。本教材中的傅里叶变换和 Z 变换部分,重点仍是定义和物理概念,对性质部分的一些容易理解且推导也简单的内容,用列表方式进行压缩,或者作为习题请读者自己推导。突出快速傅里叶变换(FFT)的思想和使用方法,去掉分裂基 FFT 和离散哈德来变换(DHT)。数字滤波器部分重点放在设计原理与方法,以及如何用 MATLAB 进行设计与分析上。将网络结构、软件实现方法、量化效应等集中在一章中,可以节约篇幅,重点放在各种实现结构的特点及各种量化效应的物理概念上。

(2) 补充新内容和新分析方法。

近几年多采样率数字信号处理广泛应用于通信与信号处理领域,为此本书进一步加强了多采样率数字信号处理的内容,主要讲授多采样率数字信号处理的基本原理、采样率变换系统的实现方法和高效实现网络结构等。在基本内容方面,增加了有关的系统分析内容和方法,引入系统的暂态输出和稳定输出的概念,增加了系统到达稳定状态所需要的时间等重要的参考数据,分析证明了用单位阶跃响应测试系统稳定性的实用方法,增加了线性卷积循环卷积的矩阵算法,使原理简单且应用方便,更贴近计算机编程处理。增加了从模拟信号到时域离散信号采样频率的确定,弥补了过去只讲模拟信号到理想采样信号的不足。增加了数字滤波器的基本概念及一些特殊滤波器,介绍了理想滤波器的特点及可实现性。增加用软件实现各种网络结构的方法。

(3) 将数字信号处理的基础理论、滤波器设计等与 MATLAB 进行适当的结合。

美国 MathWork 公司推出的 MATLAB 是当前最优秀的科技应用软件,早在 20 世纪 90 年代就已成为国际公认的信号处理标准软件和仿真开发平台。国外近几年出版的数字信号处理的优秀教材或者参考书没有一本不使用 MATLAB 的。利用 MATLAB 可以使一些很难理解的抽象理论得到直观演示解释,解决各种复杂问题的分析与计算等难题。

本书各章的基本原理,均使用 MATLAB 释疑与实现。尤其 MATLAB 使复杂的数字滤波

器设计的繁杂计算问题,变成了学生易接受、易实现的简单问题。

但是本书的主要内容仍然是数字信号处理的基本原理和基本分析方法,因此本书主要结合例题和习题介绍一些 MATLAB 程序。本书所有程序尽可能调用 MATLAB 信号处理工具箱函数解决问题,力求程序简单易读,从而保证了以基本理论为主线,以 MATLAB 作为学习理论的工具。既避免了有些作者将数字信号处理教材写成 MATLAB 编程教材的喧宾夺主现象,又能使读者利用风靡世界的 MATLAB 软件进行高效的上机实验、设计与仿真。

(4) 精心设计例题、习题与上机题。

大量的举例有利于帮助读者理解并掌握书中的基本理论,培养学生分析问题和解决问题的能力。本书重要的或者难理解的内容均有举例,而且引用了许多实际例子。本书中许多习题是经过几次编写教材,在多年的教学实践积累、改进、筛选的基础上形成的好习题,另外还参考选用了许多国外优秀教材的例题和习题,其中一些是实际中的问题。

MATLAB 语言非常适合数字信号处理,习题中的许多上机题目的明确,而且解题方法和使用的子程序,在例题中都可以找到。

数字信号处理是一门理论和实际密切结合的课程,学生在学习过程中,最好自始至终能用 MATLAB 在计算机上进行分析问题和求解问题,以便提高学生分析、解决问题的能力,提高学生数字信号处理的理论水平。

(5) 分析、叙述问题条理清楚,逻辑性强,深入浅出。

数字信号处理离不开数学,离不开数学公式的推导。在推导公式过程中尽量讲清物理概念、分析方法和推导公式的思路。有的公式推导太繁杂,仅提供最后结果,指出参考资料,并解释清楚结论。

本书共分 10 章。第 1~2 章主要叙述时域离散信号与系统时域分析和变换域分析的基本理论,是学习和应用数字信号处理的基础内容。第 3 章介绍离散傅里叶变换及其快速算法和应用。第 4 章讨论模拟信号数字处理的基本原理,包括采样定理、A/D 变换、D/A 变换、模拟信号数字处理系统的基本构成、线性模拟系统的数字模拟方法,以及用 DFT (FFT) 对模拟信号进行谱分析的基本原理。第 5~7 章主要介绍数字滤波的概念和滤波器设计与分析的原理和方法。第 5 章介绍数字滤波器的基本概念及一些特殊滤波器,包括理想数字滤波器,以及一阶和二阶简单滤波器的概念和设计方法。第 6 章讨论模拟滤波器和 IIR 数字滤波器的设计方法。第 7 章叙述 FIR 数字滤波器的主要特点和设计方法。第 8 章首先介绍时域离散系统的各种实现结构,然后讨论数字信号处理中的量化效应,并分析了 A/D 变换器中的量化效应,各种实现结构的系数量化效应,以及滤波处理运算中的量化效应。第 9 章主要介绍多采样率数字信号处理的基本原理、采样率变换系统的实现方法和高效实现网络结构等。第 10 章为数字信号处理的几种基本应用举例。每章都结合基本内容,介绍了相应的 MATLAB 信号处理工具箱函数,并给出理论仿真和例题求解程序及运行结果。每章都配有大量的习题和上机题,题号后带有“*”的习题为上机题。上机题由授课教师根据具体教学情况适当选用。

本书第 1,2,4,5,8 章由丁玉美编写,第 10 章由丁玉美和阔永红共同编写,其余各章由高西全编写。

本书的先修课程是工程数学、信号与系统、数字电路、微机原理和 MATLAB 语言等。本书参考教学时数为 60 课时。如果在信号与系统课程中已讲授本书第 1 章和第 2 章的内容,则教学时数可减少到 46 课时。第 9 章中多相滤波器结构和采样率转换系统的多级实现较难讲解,如果课时数紧张可以不讲,但要向学生说明这两种实现结构在实际中的重要性。对大专

学生，可以只讲前 8 章，参考学时数为 60 学时。

本书在编写构思和选材过程中，参考了书后所列参考文献的一些编写思想，采用了其中一些内容、例题和习题，在此向这些教材的作者们表示诚挚的感谢！

本书的出版得到电子工业出版社韩同平编辑的大力支持，为我们提供了重要的资料 and 同类教材的出版信息，对本书做了大量细致的工作，在此深表感谢！

本书得到西安电子科技大学教材建设基金资助。

为便于广大师生更好地学习和掌握数字信号处理课程的主要内容，本书将出版配套学习参考书，内容包括学习指导、习题解答、自我检查题和有关的实验程序等，也可以作为考研和自学数字信号处理的辅导书。

为了便于教师授课和师生上机仿真实验，作者免费提供本书电子课件及完整的程序集，最好由任课教师通过电子邮件向作者索取，也可以登录电子工业出版社华信教育资源网 www.huaxin.edu.cn 下载。

由于作者水平所限，书中难免有不足和错误，欢迎广大读者指正。欢迎读者反馈宝贵建议和意见，交流教学体会和经验，以便不断修正错误，去粗取精，使本教材进一步完善和提高。

编著者

于西安电子科技大学

目 录

绪论	(1)
0.1 数字信号处理的基本内容	(2)
0.2 数字信号处理的实现方法	(3)
0.3 数字信号处理的主要优点	(3)
第 1 章 时域离散信号和系统	(5)
1.1 引言	(5)
1.2 模拟信号、时域离散信号和数字信号	(5)
1.2.1 时域离散信号和数字信号	(6)
1.2.2 时域离散信号的表示方法	(6)
1.2.3 常用时域离散信号	(8)
1.3 时域离散系统	(11)
1.3.1 线性时不变时域离散系统	(11)
1.3.2 线性时不变系统输出和输入之间的关系	(12)
1.3.3 系统的因果性和稳定性	(15)
1.4 时域离散系统的输入输出描述法——线性常系数差分方程	(17)
1.4.1 线性常系数差分方程	(17)
1.4.2 线性常系数差分方程的递推解法	(17)
1.4.3 用 MATLAB 求解差分方程	(18)
1.4.4 应用举例——滑动平均滤波器	(19)
习题与上机题	(21)
第 2 章 时域离散信号和系统的频域分析	(25)
2.1 引言	(25)
2.2 时域离散信号的傅里叶变换	(25)
2.2.1 时域离散信号的傅里叶变换的定义	(25)
2.2.2 周期信号的离散傅里叶级数	(26)
2.2.3 周期信号的傅里叶变换	(28)
2.2.4 时域离散信号傅里叶变换的性质	(31)
2.3 时域离散信号的 Z 变换	(34)
2.3.1 时域离散信号 Z 变换的定义及其与傅里叶变换的关系	(34)
2.3.2 Z 变换的收敛域与序列特性之间的关系	(35)
2.3.3 逆 Z 变换	(38)
2.3.4 Z 变换的性质和定理	(41)
2.4 利用 Z 变换对信号和系统进行分析	(44)
2.4.1 系统的传输函数和系统函数	(44)
2.4.2 根据系统函数的极点分布分析系统的因果性和稳定性	(45)

2.4.3	用 Z 变换求解系统的输出响应	(46)
2.4.4	系统稳定性的测定及稳定时间的计算	(50)
2.4.5	根据系统的零、极点分布分析系统的频率特性	(52)
2.5	几种特殊滤波器	(56)
2.5.1	全通滤波器	(57)
2.5.2	最小相位滤波器	(58)
2.5.3	梳状滤波器	(59)
2.5.4	正弦波发生器	(60)
	习题与上机题	(61)
第 3 章	离散傅里叶变换 (DFT) 及其快速算法 (FFT)	(68)
3.1	离散傅里叶变换的定义及物理意义	(68)
3.1.1	DFT 定义	(68)
3.1.2	DFT 与 ZT、FT、DFS 的关系	(69)
3.1.3	DFT 的矩阵表示	(71)
3.1.4	用 MATLAB 计算序列的 DFT	(71)
3.2	DFT 的主要性质	(73)
3.3	频域采样	(80)
3.4	DFT 的快速算法——快速傅里叶变换 (FFT)	(83)
3.4.1	直接计算 DFT 的特点及减少运算量的基本途径	(83)
3.4.2	基 2 FFT 算法	(83)
3.5	DFT (FFT) 应用举例	(89)
3.5.1	用 DFT (FFT) 计算两个有限长序列的线性卷积	(90)
3.5.2	用 DFT 计算有限长序列与无限长序列的线性卷积	(91)
3.5.3	用 DFT 对序列进行谱分析	(94)
	习题与上机题	(96)
第 4 章	模拟信号数字处理	(99)
4.1	模拟信号数字处理原理方框图	(99)
4.2	模拟信号与数字信号的相互转换	(99)
4.2.1	时域采样定理	(100)
4.2.2	带通信号的采样	(104)
4.2.3	A/D 变换器	(105)
4.2.4	将数字信号转换成模拟信号	(106)
4.3	对数字信号处理部分的设计考虑	(109)
4.4	线性模拟系统的数字模拟	(110)
4.5	模拟信号的频谱分析	(112)
4.5.1	公式推导及参数选择	(112)
4.5.2	用 DFT (FFT) 对模拟信号进行谱分析的误差	(113)
4.5.3	用 DFT (FFT) 对周期信号进行谱分析	(116)
	习题与上机题	(119)

第 5 章 信号的相关函数和功率谱	(120)
5.1 互相关函数和自相关函数	(120)
5.2 周期信号的相关性	(122)
5.3 相关函数的性质	(123)
5.3.1 互相关函数性质	(124)
5.3.2 自相关函数性质	(124)
5.4 输入输出信号的相关函数	(125)
5.5 信号的能量谱密度和功率谱密度	(125)
5.5.1 信号的能量谱	(126)
5.5.2 信号的功率谱	(126)
5.6 相关函数的应用	(127)
5.6.1 相关函数在雷达和主动声呐系统中的应用	(127)
5.6.2 使用相关函数检测物理信号隐含的周期性	(128)
5.7 用 MATLAB 计算相关函数	(130)
习题与上机题	(131)
第 6 章 IIR 数字滤波器 (IIRDF) 设计	(133)
6.0 数字滤波器设计的基本概念	(133)
6.0.1 数字滤波器及其设计方法概述	(133)
6.0.2 数字滤波器的种类	(133)
6.0.3 理想数字滤波器	(134)
6.1 模拟滤波器设计	(136)
6.1.1 模拟滤波器设计指标	(137)
6.1.2 巴特沃思模拟低通滤波器设计	(138)
6.1.3 切比雪夫 (Chebyshev) 滤波器设计	(141)
6.1.4 椭圆滤波器	(144)
6.1.5 贝塞尔 (Bessel) 滤波器	(145)
6.1.6 用 MATLAB 设计模拟滤波器	(145)
6.1.7 五种类型模拟滤波器的比较	(151)
6.1.8 频率变换与高通、带通及带阻滤波器设计	(152)
6.2 IIR 数字滤波器设计	(159)
6.2.1 用脉冲响应不变法设计 IIRDF	(160)
6.2.2 用双线性变换法设计 IIRDF	(165)
6.2.3 高通、带通和带阻 IIRDF	(169)
6.2.4 IIRDF 的频率变换	(172)
习题与上机题	(175)
第 7 章 FIR 数字滤波器 (FIRDF) 设计	(179)
7.1 线性相位 FIRDF 及其特点	(179)
7.2 用窗函数法设计 FIRDF	(184)
7.2.1 用窗函数法设计 FIRDF 的基本方法	(184)
7.2.2 窗函数法的设计性能分析	(185)

7.2.3	典型窗函数介绍	(187)
7.2.4	用窗函数法设计 FIRDF 的步骤及 MATLAB 设计函数	(193)
7.3	利用频率采样法设计 FIRDF	(197)
7.3.1	频率采样设计法的基本概念	(197)
7.3.2	设计线性相位特性 FIRDF 时, 频域采样 $H(k)$ 的设置原则	(198)
7.3.3	逼近误差及改进措施	(198)
7.4	利用等波纹最佳逼近法设计 FIRDF	(202)
7.4.1	等波纹最佳逼近法的基本思想	(203)
7.4.2	remez 和 remezord 函数介绍	(205)
7.4.3	FIR 希尔伯特变换器和 FIR 数字微分器设计	(209)
7.5	FIRDF 与 IIRDF 的比较	(213)
	习题与上机题	(214)
第 8 章	时域离散系统的实现	(217)
8.1	引言	(217)
8.2	FIR 网络结构	(218)
8.2.1	FIR 直接型结构和级联型结构	(218)
8.2.2	线性相位结构	(219)
8.2.3	FIR 频率采样结构	(220)
8.2.4	FIR 滤波器的递归实现	(223)
8.2.5	快速卷积法	(224)
8.3	IIR 网络结构	(224)
8.3.1	IIR 直接型网络结构	(224)
8.3.2	IIR 级联型网络结构	(225)
8.3.3	IIR 并联型网络结构	(226)
8.3.4	转置型网络结构	(227)
8.4	格型网络结构	(227)
8.4.1	全零点格型网络结构	(228)
8.4.2	全极点格型网络结构	(231)
8.5	用软件实现各种网络结构	(233)
8.6	数字信号处理中的量化效应	(235)
8.6.1	量化及量化误差	(235)
8.6.2	A/D 变换器中的量化效应	(236)
8.6.3	系数量化效应	(237)
8.6.4	运算中的量化效应	(240)
8.7	滤波器设计与分析工具	(244)
	习题与上机题	(249)
第 9 章	多采样率数字信号处理	(253)
9.1	引言	(253)
9.2	整数因子抽取	(254)
9.3	整数因子内插	(256)

9.4	按有理数因子 I/D 的采样率转换	(258)
9.5	采样率转换滤波器的高效实现方法	(259)
9.5.1	直接型 FIR 滤波器结构	(259)
9.5.2	多相滤波器结构	(261)
9.6	采样率转换系统的多级实现	(264)
9.7	采样率转换器的 MATLAB 实现	(269)
9.8	采样率转换在数字语音系统中的应用	(270)
9.8.1	数字语音系统中的信号采样过程及其存在的问题	(270)
9.8.2	数字语音系统中改进的 A/D 转换方案	(271)
9.8.3	接收端 D/A 转换器的改进方案	(272)
	习题与上机题	(274)
第 10 章	数字信号处理应用举例	(276)
10.1	引言	(276)
10.2	数字信号处理在双音多频拨号系统中的应用	(276)
10.3	数字信号处理在音乐信号处理中的应用	(282)
10.3.1	时域处理	(282)
10.3.2	频域处理	(285)
附录 A	MATLAB 信号处理工具箱函数表	(289)
	参考文献	(293)

绪 论

随着计算机和信息学科快速发展,数字信号处理的理论与应用得到了飞跃式的发展,现在已经形成一门极其重要的独立学科体系。数字信号处理是利用计算机或专用数字处理设备,采用数值计算的方法对信号进行处理的一门学科,它包括数据采集,以及对信号进行变换、分析、综合、滤波、估值与识别等加工处理,以便于提取信息和应用。与传统的模拟处理方法相比较,数字处理具有无法比拟的优点。数字信号处理系统可以对数字信号进行处理,也可以对模拟信号进行处理。当然,必须先将模拟信号变换成数字信号,才能用数字信号处理系统处理。

数字信号处理原理、实现和应用是本学科研究与发展的三个主要方面。数字信号处理应用非常广泛,涉及语音、雷达、声呐、地震、图像处理、通信系统、系统控制、生物医学工程、机械振动、遥感遥测、航空航天、电力系统、故障检测和自动化仪表等众多领域。显然,研究数字信号处理的应用一定要涉及各个应用领域的专门知识,所以,它不是本课程的学习重点。数字信号处理原理及其实现方法和技术是一门脱离具体应用学科的专业基础,是本课程学习的重点。

信号可以定义为携带信息的函数。信号一般分为确定性信号和随机信号(平稳随机信号和非平稳随机信号),两种信号都有一维信号和 multidimensional 信号。确定性信号和随机信号处理的原理和方法也不同。随机信号处理基于随机过程、信号与系统和最优化理论,采用统计的方法进行分析和处理,这部分内容将在研究生课程中学习。本课程仅学习一维确定性信号处理的原理、实现和应用。

绝大部分一维信号是时间的函数,信号又可分为模拟信号(即连续信号)、时域离散信号、幅度离散信号和数字信号。模拟信号的幅度(信号值)和自变量(时间)都取连续值,如麦克风输出的语音信号,温度信号等。时域离散信号的幅度取连续值,但自变量取离散值,如气象站定时测量的温度信号,数字电话系统每隔 0.125 ms 对语音信号的采样信号。幅度离散信号的幅度取离散值,但自变量取连续值,如多进制数字幅度调制信号就是典型的幅度离散信号。数字信号的幅度和自变量都取离散值,数字信号的幅度可以用有限位二进制数表示。所以,时域离散信号可以看成对模拟信号的时域等间隔采样信号,对时域采样信号的幅度量化(离散化)的结果是数字信号。一般将能够直接处理模拟信号、时域离散信号和数字信号的系统分别称为模拟系统、时域离散系统和数字系统。

用数字处理系统处理模拟信号的原理方框图如图 0.1 所示。在工程实际中,将采样和量化编码两部分集成在一起,称为模数转换器,其功能是将模拟信号变换成数字信号。量化编码器的作用是将采样得到的每个信号样值变换成有限位二进制编码。

随着计算机和专用数字处理系统的字长不断增加,模数转换器的量化误差、数字处理系统的系统参数量化误差,以及处理过程中的运算误差越来越小,如果忽略这些误差,模数转换器就与采样等价,数字处理系统与时域离散系统等价,则图 0.1 可以简化成图 0.2,即用 时域离散系统处理模拟信号的原理方框图。

图 0.1 清楚地说明了工程实际中所用的数字信号处理系统的构成,而图 0.2 只是一种理论

模型。因为时域离散线性时不变系统分析与设计理论已完全成熟，所以，通常根据要求先设计图 0.2 中的时域离散系统，再根据对信号处理的精度要求，选取合适的量化位数，对采样信号 $x(n)$ 和时域离散线性时不变系统的参数进行量化，就将时域离散系统变成了数字系统。因此，本课程主要学习图 0.2 中所涉及的理论的实现方法，并介绍图 0.1 中的量化误差效应。由于量化误差与量化位数（字长）直接相关，所以又将量化误差效应称为有限字长效应。

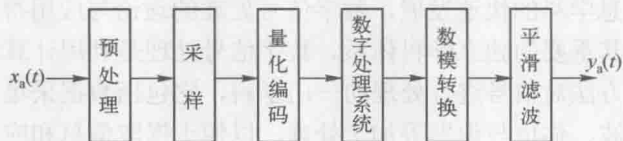


图 0.1 用数字系统处理模拟信号的原理方框图

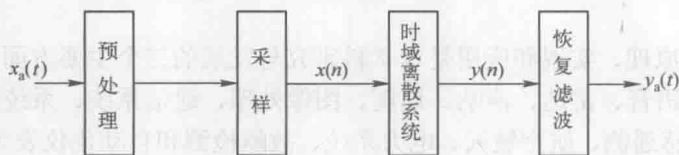


图 0.2 用时域离散系统处理模拟信号的原理方框图

0.1 数字信号处理的基本内容

确定性数字信号处理的基本理论主要包括如下内容：

- (1) 模拟信号的预处理（又称预滤波或者前置滤波）：滤除输入模拟信号中的无用频率成分和噪声，避免采样后发生频谱混叠失真；
- (2) 模拟信号的时域采样与恢复：模数转换技术，采样定理，量化误差分析等；
- (3) 时域离散信号与系统的分析：信号的表示与运算，各种变换（傅里叶变换、Z 变换和离散傅里叶变换），时域离散信号与系统的时域和频域的描述与分析；
- (4) 数字信号处理中的快速算法：快速傅里叶变换，快速卷积等；
- (5) 模拟滤波器和数字滤波器分析、设计与实现；
- (6) 多采样率信号处理技术：采样率转换系统的基本原理及其高效实现方法。

上述六个方面的基本内容也是本课程的基本内容。随着通信技术、电子技术、计算机和超大规模集成电路技术的飞速发展，数字信号处理的理论也在不断地丰富与完善，各种新理论和新算法不断出现，特别是关于平稳随机信号和非平稳随机信号处理的现代信号处理理论的研究更加活跃。本课程作为一门专业基础课，所学的内容仅是学习现代信号处理理论和专门技术的基础。

应当注意，数字信号处理的理论、算法和实现方法这三者是密不可分的。把一个好的信号处理理论应用于工程实际，需要相应的算法以便使信号处理高速高效，并使实现系统简单易行。所以，除了上述基本理论，数字信号处理算法及其实现技术也是极其重要的研究内容。例如，频谱分析和滤波是最基本的信号处理，频谱分析就是计算信号的离散傅里叶变换（DFT），滤波实质上就是计算两个信号的卷积。快速傅里叶变换（FFT）的提出使频谱分析和滤波处理的速度提高几百倍。所以，国际上将 1965 年发表第一篇快速傅里叶变换论文作为

数字信号处理学科的一个里程碑。数字信号处理算法不是本课程的重点，读者建立有关算法的概念就可以了，算法一般要结合具体理论和具体信号处理系统进行研究和改进。

0.2 数字信号处理的实现方法

数字信号处理的实现方法一般分为软件实现、专用硬件实现和软硬件结合实现，每种实现方法各有特点。例如，一阶时域离散线性时不变系统可以用如下差分方程描述：

$$y(n) = ay(n-1) + x(n)$$

后面会看到：当 $0 < a < 1$ 时，系统为低通滤波器；当 $-1 < a < 0$ 时，系统为高通滤波器。软件实现就是在通用计算机上编程序求解差分方程，得到对输入信号 $x(n)$ 的滤波处理结果 $y(n)$ 。用硬件实现的原理方框图如图 0.3 所示，由一个加法器、一个乘法器和一个延时器构成。

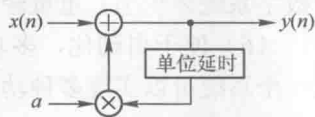


图 0.3 一阶时域离散线性时不变系统的硬件实现

下面介绍数字信号处理的三种实现方法及其特点。

(1) 软件实现：在通用计算机上编程序实现各种复杂的处理算法。程序可以由处理者开发，也可以使用信号处理程序库中现成的程序。软件处理的最大优点是灵活，开发周期短。其缺点是处理速度慢。所以多用于处理算法研究、教学实验和一些对处理速度要求较低场合。

(2) 专用硬件实现：采用加法器、乘法器和延时器构成的专用数字网络，或用专用集成电路实现某种专用的信号处理功能。如调制解调器、快速傅里叶变换芯片、数字滤波器芯片等。这种实现方法的主要优点是处理速度快，缺点是不灵活，开发周期长。适用于要求高速实时处理的一些专用设备，这些设备一旦定型，就不再改动，便于大批生产。如数字电视接收机中的高速处理单元。

(3) 软硬件结合实现：依靠通用单片机或数字信号处理专用单片机 (DSP) 的硬件资源，配置相应的信号处理软件，实现工程实际中的各种信号处理功能。如数字控制系统和智能仪器设备等。DSP 芯片内部带有硬件乘法器、累加器，采用流水线工作模式和并行结构，并配有适合信号处理运算的高效指令。由于这种实现方法集中了软件实现和专用硬件实现的优点，高速、灵活、开发周期短，因此 DSP 技术及其应用已成为信号处理学科研究的中心内容之一。

0.3 数字信号处理的主要优点

模拟信号处理系统只能对信号进行一些常规的简单处理，而数字信号处理是用数值运算的方法实现对信号的处理，可以用计算机进行很多复杂的处理。所以，相对于模拟信号处理，数字信号处理有很多优点，主要优点归纳如下：

(1) 灵活性好。数字信号适合用计算机处理，也可以用可编程器件（如通用单片机、DSP、可编程逻辑器件等）实现，通过编程很容易改变数字信号处理系统的参数，从而使系统实现各种不同的处理功能。灵活性还体现在数字系统容易实现时分复用、码分复用等，如数字电话系统中就采用了时分复用技术。

(2) 稳定可靠，不存在阻抗匹配问题。只要设计正确，就可以确保数字系统稳定工作。稳定可靠的另一种含义是指数字系统的特性不易随使用条件（如温度等）的变化而变化。由于各级数字系统之间是通过数据进行耦合的，所以不存在模拟电路中的阻抗匹配问题。例如，

用两个程序模块实现某种信号处理功能，将第一级程序的处理结果数据作为第二级程序的输入数据。

(3) 处理精度高。用模拟电路计算对数时，达到 1% 的精度都很困难，而且模拟电路内部和外部噪声也影响处理精度。数字系统的处理精度由系统字长（二进制位数）决定，计算机和 DSP 的字长由 8 位提高到 16、32 和 64 位，可以选择合适的字长满足各种精度要求。另外，数字系统工作在二进制状态，所以基本不受内部噪声的干扰。

(4) 便于加解密。随着信息安全要求越来越高，加解密算法越来越复杂，只有数字处理才能解决这种问题。

(5) 便于大规模集成化、小型化。由于数字电路对电路参数的一致性要求低，组成数字系统的基本单元和基本模块具有高度的一致性，所以便于大规模集成和大规模生产。从而使数字系统体积小、重量轻、性能价格比高。

(6) 便于自动化，多功能化。数字系统很容易根据各种状态自动执行相应的操作，并且一个系统可以实现多种功能。例如，手机可以完成通话、发短信、玩游戏、日常事务管理和上网等多种功能。

(7) 可以实现模拟系统无法实现的复杂处理功能。模拟系统只能对信号进行一些简单的处理，如放大、滤波、经典的调制与解调等。但是，数字系统可以实现很多模拟系统无法实现的现代处理功能。例如，解卷积、时分复用、特高选择性滤波、严格的线性相位特性、复杂的数学运算、信号的任意存取、各种复杂的处理与变幻（电视系统中的多画面、各种特技效果、特殊的音响和配音效果等）。

由于上述优点，数字信号处理理论与实现技术成为近 40 年来经久不衰的研究热点，使本学科成为发展最快，新理论与新技术层出不穷，应用领域最广泛的新学科之一。现在，本学科已经形成一门理论体系完整的独立学科。

数字信号处理理论及其实现与应用技术的内容非常丰富和广泛，涉及微积分、随机过程、高等代数、数值分析、复变函数和各种变换（傅里叶变换，Z 变换，离散傅里叶变换，小波变换，……）等数学工具，数字信号处理的理论基础包括网络理论、信号与系统等，其实现技术又涉及计算机、DSP 技术、微电子技术、专用集成电路设计、神经网络和程序设计等方面。通信、雷达、人工智能、模式识别、航空航天、图像处理等，都是数字信号处理的应用领域。由此可见，要从事数字信号处理理论研究和应用开发工作，需要学习的知识很多。本书作为数字信号处理的基础教材，主要讨论数字信号处理的基本原理和基本分析方法，作为今后学习上述专门知识和技术的基础。