

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

21 世纪高等学校通信类规划教材

# 数字信号处理

——原理、实现及应用——

Digital Signal Processing:

Principles, Implementations and Applications

高西全 丁玉美 阔永红 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

21 世纪高等学校通信类规划教材

# 数字信号处理

——原理、实现及应用

**Digital Signal Processing:  
Principles, Implementations and Applications**

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，阔永红编著. —北京：电子工业出版社，2006.8  
(21世纪高等学校通信类规划教材)

ISBN 7-121-02753-4

I. 数... II. ①高...②丁...③阔... III. 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 (2006) 第 061966 号

责任编辑：韩同平 特约编辑：杨逢仪

印 刷：北京天宇星印刷厂

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

经 销：各地新华书店

开 本：787×1092 1/16 印张：19 字数：504.7 千字

印 次：2006 年 8 月第 1 次印刷

印 数：4000 册 定价：26.80 元

凡购买电子工业出版社的图书，如有缺损问题，请向购买书店调换；若书店售缺，请与本社发行部联系。联系电话：(010) 68279077。质量投诉请发邮件至 [zlt@phei.com.cn](mailto:zlt@phei.com.cn)，盗版侵权举报请发邮件至 [dbqq@phei.com.cn](mailto:dbqq@phei.com.cn)。

# 《21世纪高等学校通信类规划教材》顾问委员

(按姓名音序排列)

迟惠生 (北京大学)  
冯重熙 (清华大学)  
吴伟陵 (北京邮电大学)  
谢希仁 (解放军理工大学)

程时昕 (东南大学)  
李承恕 (北京交通大学)  
吴诗其 (电子科技大学)  
袁保宗 (北京交通大学)

# 《21世纪高等学校通信类规划教材》编审委员

(按姓名音序排列)

**主任委员:** 樊昌信 (西安电子科技大学)

## 副主任委员:

顾婉仪 (北京邮电大学)  
彭启琮 (电子科技大学)  
王希勤 (清华大学)  
吴镇扬 (东南大学)

李建东 (西安电子科技大学)  
王金龙 (解放军理工大学)  
文宏武 (电子工业出版社)  
张思东 (北京交通大学)

## 委员:

安建平 (北京理工大学)  
陈咏恩 (同济大学)  
段哲民 (西北工业大学)  
范平志 (西南交通大学)  
鄞广增 (南京邮电大学)  
顾学迈 (哈尔滨工业大学)  
李建东 (西安电子科技大学)  
刘 璐 (山东大学)  
仇佩亮 (浙江大学)  
唐向宏 (杭州电子科技大学)  
王金龙 (解放军理工大学)  
王祖林 (北京航空航天大学)  
韦 岗 (华南理工大学)  
徐昌庆 (上海交通大学)  
张思东 (北京交通大学)  
朱光喜 (华中科技大学)

鲍长春 (北京工业大学)  
邓建国 (西安交通大学)  
樊昌信 (西安电子科技大学)  
方 勇 (上海大学)  
顾婉仪 (北京邮电大学)  
康 健 (吉林大学)  
李晓峰 (电子科技大学)  
彭启琮 (电子科技大学)  
唐朝京 (国防科技大学)  
田宝玉 (北京邮电大学)  
王希勤 (清华大学)  
文宏武 (电子工业出版社)  
吴镇扬 (东南大学)  
张德民 (重庆邮电学院)  
郑建生 (武汉大学)  
朱秀昌 (南京邮电大学)

**编辑出版组:** 韩同平 王羽佳 姚晓竞

**联系电话:** (010)88254525 **E-mail:** hantp@phei.com.cn

# 出版说明

教材建设是高等学校教学和学科建设的主要内容之一。近几年来,我国各高等学校实施了一系列面向21世纪教学改革计划,在教学内容和课程体系改革上取得了丰硕的成果,因此需要适时推出适应教改成果的教材。同时,通信技术发展十分迅速,原有教材中,或者内容已比较陈旧、落后,难以适应教学的要求,需要修订或重新编写;或者需要开设新课程,编写新教材以填补空白。

电子工业出版社作为以信息技术领域出版为特色的中央级科技与教育出版社,始终关注着电子信息技术的发展方向,始终把出版适应我国高等学校发展要求的高质量精品教材放在重要位置上。我社出版了一系列特色鲜明的教材,希望能把它们放在学生的书包里、课桌上,为培养高素质人才打下良好的基础。

基于上述考虑,经过一年多的调研,并征求多方的意见,根据国内高等学校通信专业的发展现状,以及教育部《关于十五期间普通高等教育教材建设与改革意见》的指示精神,电子工业出版社规划出版了这套“21世纪高等学校通信类规划教材”。

目前,我国多数高等学校都设有通信专业,但办学水平、特色及人才培养层次差异很大。这套教材定位于重点高校,即以研究型、研究教学型人才培养为主的高等学校通信类专业,包括其他相关专业的通信类课程教材。因此,教材的作者全部来自于重点高校,多数是“信息与通信工程”一级学科设有全国重点学科的高校。

与以往出版的同类教材相比,这套教材具有以下特点:

(1) 专业特色鲜明:以重点院校本科通信类专业的专业课程教材为主线,兼顾其他相关专业的通信类课程。

(2) 突出系统性:本套规划教材覆盖了本科通信类专业的专业基础课、专业方向课及专业选修课,形成一个完整的教材系列,规模之大是以往教材中所不多见的。同时注意教材之间内容的合理划分与衔接,层次分明,重点突出,各高校可以根据需要组合选用,我们的目的是为通信类课程打造一套全方位解决方案。

(3) 体系、内容新颖:整个知识点建立在“高”、“新”平台上。基本理论阐述精练,深入浅出,便于自学;注意吸收新理论、新技术成果在人才培养中的作用;加强实践性与应用性,结合实例进行讲解。

(4) 配套教学支持:多数教材配有教学课件(电子教案),部分重要课程配套出版教学辅导书或实验教材。

(5) 质量保证:多数教材为已出版教材的修订版,原教材在高校的影响大;重新规划的教材将在组织专家/教授对写作大纲和知识点进行充分讨论的基础上,选择优秀作者编写。

本套教材可作为高等学校通信专业及相关专业的本科生或研究生教材,也可供通信领域的有关专业人员学习参考。

为做好本套教材的出版工作,我们聘请了多位国内通信教育领域的著名教授作为教材顾问,并聘请了清华大学、东南大学、上海交通大学、北京交通大学、北京邮电大学、西安电子科技大学、电子科技大学等著名高校电子信息学院(系)的院长(系主任)成立教材编委会,从根本上保证了教材的高质量。在此对他们的辛勤工作表示衷心的感谢。

今后,我们将进一步加强同各高校教师的密切联系和合作,广泛听取一线教师对教材的反馈意见和建议,以便使我们的教材出版工作做得更好。

电子工业出版社

# 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方面原理、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，增加了有关新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，增加了线性卷积列表算法和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，一阶、二阶滤波器的构成和带宽计算方法。增加陷波器、谐振器及振荡器等。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) 例题、习题与上机题多。

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,语言深入浅出。

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和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！

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](http://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。

作者联系电话：(029) 88202853，电子邮件地址：[xqgao@mail.xidian.edu.cn](mailto:xqgao@mail.xidian.edu.cn)。

编著者  
于西安电子科技大学



## 意见反馈表

感谢您关注本书！烦请填写该表。您的意见对我们出版优秀教材、服务教学，十分重要。我们会根据您的要求，定期给您发送我社相关教材的出版资讯或目录，或寄送相关样书。

### 个人资料

姓名\_\_\_\_\_ 电话\_\_\_\_\_ 手机\_\_\_\_\_ E-mail\_\_\_\_\_

学校\_\_\_\_\_ 院系\_\_\_\_\_ 专业\_\_\_\_\_ 职称或职务\_\_\_\_\_

### 您一般从何处获得所需的教材信息

经人介绍  书店  出版社寄送的资料或样书  出版社网站  杂志、报纸宣传

其他\_\_\_\_\_

### 影响您选定教材的因素

内容  作者  装帧设计  篇幅  价格  出版社  是否获奖  上级要求

广告  其他\_\_\_\_\_

### 您对本书的总体评价

从内容角度看  很满意  满意  一般 从教学适用角度看  很满意  满意  一般

从印刷、装帧设计角度看  很满意  满意  一般 从价位角度看  偏贵  合适  不贵

### 本书比较令您满意的是

适宜教学  实例丰富  内容充实  讲解通畅  其他\_\_\_\_\_

### 您希望本书在哪些方面进行改进？

---

---

---

---

本书可否作为您的教材  否  是，会用于\_\_\_\_\_课程教学。

注：如有其他意见或建议，可另附页。

谢谢您的配合，来信请寄：

地址：北京市万寿路 173 信箱 教材服务部 邮编：100036

E-mail: edu@phei.com.cn 电话：010-88254488 传真：010-88254483

MSN: edu@phei.com.cn

# 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)
<b>第 1 章 时域离散信号和系统 .....</b>	<b>(5)</b>
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)
<b>第 2 章 时域离散信号和系统的频域分析 .....</b>	<b>(26)</b>
2.1 引言 .....	(26)
2.2 时域离散信号的傅里叶变换 .....	(26)
2.2.1 时域离散信号的傅里叶变换的定义 .....	(26)
2.2.2 周期信号的离散傅里叶级数 .....	(27)
2.2.3 周期信号的傅里叶变换 .....	(29)
2.2.4 时域离散信号傅里叶变换的性质 .....	(32)
2.3 时域离散信号的 Z 变换 .....	(35)
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 .....	(35)
2.3.2 Z 变换的收敛域与序列特性之间的关系 .....	(36)
2.3.3 逆 Z 变换 .....	(39)
2.3.4 Z 变换的性质和定理 .....	(42)
2.4 利用 Z 变换对信号和系统进行分析 .....	(45)
2.4.1 系统的传输函数和系统函数 .....	(45)
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 .....	(46)

2.4.3	用 Z 变换求解系统的输出响应 .....	(47)
2.4.4	系统稳定性的测定及稳定时间的计算 .....	(51)
2.4.5	根据系统的零、极点分布分析系统的频率特性 .....	(53)
	习题与上机题 .....	(57)
<b>第 3 章</b>	<b>离散傅里叶变换 (DFT) 及其快速算法 (FFT)</b> .....	<b>(63)</b>
3.1	离散傅里叶变换的定义及物理意义 .....	(63)
3.1.1	DFT 定义 .....	(63)
3.1.2	DFT 与 ZT、FT、DFS 的关系 .....	(64)
3.1.3	DFT 的矩阵表示 .....	(66)
3.1.4	用 MATLAB 计算序列的 DFT .....	(66)
3.2	DFT 的主要性质 .....	(68)
3.3	频域采样 .....	(75)
3.4	DFT 的快速算法——快速傅里叶变换 (FFT) .....	(78)
3.4.1	直接计算 DFT 的特点及减少运算量的基本途径 .....	(78)
3.4.2	基 2 FFT 算法 .....	(78)
3.5	DFT (FFT) 应用举例 .....	(84)
3.5.1	用 DFT (FFT) 计算两个有限长序列的线性卷积 .....	(85)
3.5.2	用 DFT 计算有限长序列与无限长序列的线性卷积 .....	(86)
3.5.3	用 DFT 对序列进行谱分析 .....	(89)
	习题与上机题 .....	(91)
<b>第 4 章</b>	<b>模拟信号数字处理</b> .....	<b>(94)</b>
4.1	模拟信号数字处理原理方框图 .....	(94)
4.2	模拟信号与数字信号的相互转换 .....	(94)
4.2.1	时域采样定理 .....	(95)
4.2.2	由模拟信号到时域离散信号采样频率的确定 .....	(97)
4.2.3	带通信号的采样 .....	(98)
4.2.4	A/D 变换器 .....	(99)
4.2.5	将数字信号转换成模拟信号 .....	(100)
4.3	对数字信号处理部分的设计考虑 .....	(102)
4.4	线性模拟系统的数字模拟 .....	(104)
4.5	模拟信号的频谱分析 .....	(106)
4.5.1	公式推导及参数选择 .....	(106)
4.5.2	用 DFT (FFT) 对模拟信号进行谱分析的误差 .....	(107)
4.5.3	用 DFT (FFT) 对周期信号进行谱分析 .....	(110)
	习题与上机题 .....	(112)
<b>第 5 章</b>	<b>数字滤波器的基本概念及一些特殊滤波器</b> .....	<b>(114)</b>
5.1	数字滤波器的基本概念 .....	(114)
5.2	理想数字滤波器 .....	(115)
5.2.1	理想数字滤波器的特点及分类 .....	(115)
5.2.2	理想滤波器的可实现性 .....	(117)

5.3	简单滤波器的设计	(117)
5.3.1	一阶数字滤波器	(117)
5.3.2	一阶低通滤波器带宽的计算	(119)
5.3.3	二阶数字滤波器	(120)
5.3.4	低通到高通的简单变换	(122)
5.4	数字谐振器	(123)
5.5	数字陷波器	(125)
5.6	全通滤波器	(127)
5.7	最小相位滤波器	(128)
5.8	梳状滤波器	(129)
5.9	正弦波发生器	(131)
	习题与上机题	(132)
<b>第6章</b>	<b>IIR 数字滤波器设计</b>	<b>(136)</b>
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) 滤波器设计	(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	(158)
6.2.1	用脉冲响应不变法设计 IIR 数字滤波器	(159)
6.2.2	用双线性变换法设计 IIR 数字滤波器	(163)
6.2.3	高通、带通和带阻 IIR 数字滤波器设计	(167)
6.2.4	IIR 数字滤波器的频率变换	(170)
	习题与上机题	(174)
<b>第7章</b>	<b>FIR 数字滤波器设计</b>	<b>(177)</b>
7.1	线性相位 FIRDF 及其特点	(177)
7.2	用窗函数法设计 FIRDF	(182)
7.2.1	用窗函数法设计 FIRDF 的基本方法	(182)
7.2.2	窗函数法的设计性能分析	(183)
7.2.3	典型窗函数介绍	(185)
7.2.4	用窗函数法设计 FIRDF 的步骤及 MATLAB 设计函数	(191)
7.3	利用频率采样法设计 FIRDF	(195)
7.3.1	频率采样设计法的基本概念	(195)
7.3.2	设计线性相位特性 FIRDF 时, 频域采样 $H(k)$ 的设置原则	(196)
7.3.3	逼近误差及改进措施	(196)
7.4	利用等波纹最佳逼近法设计 FIRDF	(200)

7.4.1	等波纹最佳逼近法的基本思想	(201)
7.4.2	remez 和 remezord 函数介绍	(203)
7.4.3	FIR 希尔伯特变换器和 FIR 数字微分器设计	(207)
7.5	FIRDF 与 IIRDF 的比较	(211)
	习题与上机题	(212)
<b>第 8 章</b>	<b>时域离散系统的实现</b>	<b>(215)</b>
8.1	引言	(215)
8.2	FIR 网络结构	(216)
8.2.1	FIR 直接型结构和级联型结构	(216)
8.2.2	线性相位结构	(217)
8.2.3	FIR 频率采样结构	(218)
8.2.4	快速卷积法	(221)
8.3	IIR 网络结构	(221)
8.3.1	IIR 直接型网络结构	(221)
8.3.2	IIR 级联型网络结构	(225)
8.3.3	IIR 并联型网络结构	(224)
8.3.4	转置型网络结构	(224)
8.4	格型网络结构	(225)
8.4.1	全零点格型网络结构	(225)
8.4.2	全极点格型网络结构	(228)
8.5	用软件实现各种网络结构	(230)
8.6	数字信号处理中的量化效应	(232)
8.6.1	量化及量化误差	(233)
8.6.2	A/D 变换器中的量化效应	(234)
8.6.3	系数量化效应	(235)
8.6.4	运算中的量化效应	(238)
8.7	滤波器设计与分析工具	(242)
	习题与上机题	(246)
<b>第 9 章</b>	<b>多采样率数字信号处理</b>	<b>(250)</b>
9.1	引言	(250)
9.2	整数因子抽取	(251)
9.3	整数因子内插	(253)
9.4	按有理数因子 I/D 的采样率转换	(255)
9.5	采样率转换滤波器的高效实现方法	(256)
9.5.1	直接型 FIR 滤波器结构	(256)
9.5.2	多相滤波器结构	(258)
9.6	采样率转换系统的多级实现	(261)
9.7	采样率转换器的 MATLAB 实现	(265)
9.8	采样率转换在数字语音系统中的应用	(266)
9.8.1	数字语音系统中的信号采样过程及其存在的问题	(267)

9.8.2 数字语音系统中改进的 A/D 转换方案	(268)
9.8.3 接收端 D/A 转换器的改进方案	(268)
习题与上机题	(270)
<b>第 10 章 数字信号处理应用举例</b>	<b>(272)</b>
10.1 引言	(272)
10.2 数字信号处理在双音多频拨号系统中的应用	(272)
10.3 数字信号处理在音乐信号处理中的应用	(278)
10.3.1 时域处理	(278)
10.3.2 频域处理	(281)
<b>附录 A MATLAB 信号处理工具箱函数表</b>	<b>(285)</b>
<b>参考文献</b>	<b>(289)</b>

## 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。

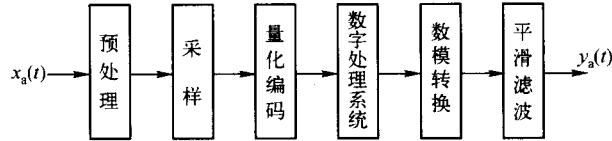


图 0.1 用数字系统处理模拟信号的原理方框图

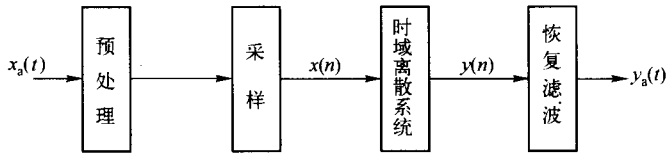


图 0.2 用时域离散系统处理模拟信号的原理方框图

## 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。

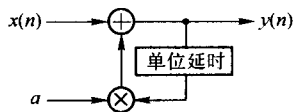


图 0.3 一阶时域离散线性时不变系统的硬件实现

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的场合。

(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，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，