



“十二五”江苏省高等学校重点教材

高等院校信息与通信工程系列教材

第1版获评为江苏省精品教材

DIGITAL SIGNAL PROCESSING: PRINCIPLES AND PRACTICE
(SECOND EDITION)

数字信号处理 原理及实现

(第2版)

王艳芬 王刚 张晓光 刘卫东◎编著

Wang Yanfen

Wang Gang

Zhang Xiaoguang

Liu Weidong

清华大学出版社





“十二五”江苏省高等学校重点教材

高等院校信息与通信工程系列教材

DIGITAL SIGNAL PROCESSING: PRINCIPLES AND PRACTICE
(SECOND EDITION)

数字信号处理 原理及实现

(第2版)

王艳芬 王刚 张晓光 刘卫东◎编著

Wang Yanfen Wang Gang Zhang Xiaoguang Liu Weidong

清华大学出版社

内 容 简 介

本书系统阐述了数字信号处理的基本原理、算法分析和实现,共包括9章内容,即绪论、离散时间信号与系统的时域分析、离散时间信号与系统的频域分析、离散傅里叶变换(DFT)、快速傅里叶变换(FFT)、IIR数字滤波器的设计、FIR数字滤波器的设计、数字滤波器结构与有限字长效应、多采样率数字信号处理以及数字信号处理实验等。

本书概念清楚、理论完整、分析透彻,特别是自始至终运用MATLAB来阐述基本概念和基本原理,将经典理论与现代技术相结合,使知识点的叙述更加清楚易懂。本书还结合实际给出了MATLAB上机实验内容,并配有上机习题,可以作为课程实验练习和上机考试的复习题。

本书可作为高等院校信息工程、电子信息工程、通信工程、电子科学与技术、电气工程及其自动化、自动化、计算机科学与技术等专业的本科生教材,也可作为从事信息处理、通信工程、电子系统设计等领域的科学研究与工程技术人员的参考用书。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理原理及实现/王艳芬等编著.—2版.—北京:清华大学出版社,2013

(高等院校信息与通信工程系列教材)

ISBN 978-7-302-31241-3

I. ①数… II. ①王… 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(2013)第001687号

责任编辑:盛东亮

封面设计:李召霞

责任校对:梁毅

责任印制:何芊

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦A座 邮 编:100084

社总机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

课 件 下 载: <http://www.tup.com.cn>, 010-62795954

印 刷 者:三河市君旺印装厂

装 订 者:三河市新茂装订有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×260mm 印 张:21.5 字 数:532千字

版 次:2008年3月第1版 2013年10月第2版 印 次:2013年10月第1次印刷

印 数:14501~17500

定 价:35.00元

高等院校信息与通信工程系列教材编委会

主 编：陈俊亮

副 主 编：李乐民 张乃通 邬江兴

编 委 （排名不分先后）：

王 京 韦 岗 朱近康 朱世华

邬江兴 李乐民 李建东 张乃通

张中兆 张思东 严国萍 刘兴钊

陈俊亮 郑宝玉 范平志 孟洛明

袁东风 程时昕 雷维礼 谢希仁

责任编辑：盛东亮

出版说明

信息与通信工程学科是信息科学与技术的重要组成部分。改革开放以来,我国在发展通信系统与信息系统方面取得了长足的进步,形成了巨大的产业与市场,如我国的电话网络规模已位居世界首位,同时该领域的一些分支学科出现了为国际认可的技术创新,得到了迅猛的发展。为满足国家对高层次人才的迫切需求,当前国内大量高等学校设有信息与通信工程学科的院系或专业,培养大量的本科生与研究生。为适应学科知识不断更新的发展态势,他们迫切需要内容新颖又符合教改要求的教材和教学参考书。此外,大量的科研人员与工程技术人员也迫切需要学习、了解、掌握信息与通信工程学科领域的基础理论与较为系统的前沿专业知识。为了满足这些读者对高质量图书的渴求,清华大学出版社组织国内信息与通信工程国家级重点学科的教学与科研骨干以及本领域的一些知名学者、学术带头人编写了这套高等院校信息与通信工程系列教材。

该套教材以本科电子信息工程、通信工程专业的专业必修课程教材为主,同时包含一些反映学科发展前沿的本科选修课程教材和研究生教学用书。为了保证教材的出版质量,清华大学出版社不仅约请国内一流专家参与了丛书的选题规划,而且每本书在出版前都组织全国重点高校的骨干教师对作者的编写大纲和书稿进行了认真审核。

祝愿《高等院校信息与通信工程系列教材》为我国培养与造就信息与通信工程领域的高素质科技人才,推动信息科学的发展与进步做出贡献。

北京邮电大学
陈俊亮

前 言

《数字信号处理原理及实现》教材自 2008 年 3 月由清华大学出版社出版以来,至今已有 5 年。本书在使用中得到了读者的好评,并于 2009 年 7 月荣获江苏省精品教材奖。

本书是《数字信号处理原理及实现》的第 2 版。和第 1 版相比,本书有以下改进:

(1) 第 1 章和第 2 章分别对奈奎斯特采样定理和频率响应的物理意义等内容的阐述进行了补充和完善。

(2) 第 3 章 3.6 节增加了“用 DFT 计算线性卷积和线性相关”及相应的例题等内容; 3.7.1 节强调了频域抽样和截断的概念; 改写了 3.7.2 节中的截断效应和栅栏效应的基本概念,叙述更加完善。

(3) 第 4 章增加了 4.7 节“ N 为复合数的混合基 FFT 算法”; 对 4.3.2 节内容进行了补充。

(4) 第 5 章将原书 5.1 节引言拆分成了两节“5.1 引言”和“5.2 数字滤波器的基本概念”,并在 5.2 节新增“数字滤波器原理”内容,重新改写了“数字滤波器的技术指标”内容。对“双线性变换法中的频率失真和预畸变”内容重新进行了梳理,以期更易理解。在“数字滤波器的频率变换”部分增加了不同类型滤波器之间相互转换的判断方法内容和例题。增加了 IIR 数字滤波器直接设计法中的“零、极点累试法”内容以及 5.8 节“IIR 数字滤波器的相位均衡”。

(5) 第 6 章对幅度函数特点、窗函数设计法、频率采样法等内容重新进行了梳理和扩充,增加了多幅插图,将 6.3 节和 6.4 节中相同参数理论求解和 MATLAB 实现部分例题进行了合并,以使内容编排更加合理。对 6.5.1 节“等波纹逼近准则”进行了优化,新增 6.6 节“简单整系数法设计 FIR 数字滤波器”。

(6) 第 7 章增加了后续课及实际应用中涉及较多的 7.5 节“数字滤波器的格型结构”以及 7.6 节“有限字长效应”,并将本章名改为“数字滤波器结构与有限字长效应”。

(7) 各章均增加了“本章小结”,并且每章都增加了部分习题。

(8) 新增第 8 章“多采样率数字信号处理”,以适应学科的发展。本章分析了序列的整数倍抽取与插值和有理倍数改变抽样率的基本概念、理论和方法以及它们的高效结构等。

(9) 将原来的第 8 章“MATLAB 上机实验”改为第 9 章“数字信号处理实验”,重新编写了 9.1 节 MATLAB 语言简介部分,以使内容叙述更具有条理性。调整了原章节体系结构,将基础实验部分按节重新排列为 9.2~9.5 节,删除了交互式工具应用实验部分。重点突出和充实了基于 MATLAB 编程的基础实验内容,为了突出数字信号处理在实际中的应用,增加了 9.6 节实验五“立体声延时音效处理”,使教材理论与实际结合更加紧密。

(10) 取消原书中的附录“本书用到的 MATLAB 特殊函数”部分,同时把相关内容按原书出现的顺序调整到各章节当中,增强了内容的可读性。

(11) 除做了上述扩充和修改,使教材内容更加完整外,每一章都对部分语句进行了优化,使问题的叙述更加完善,层次更加清晰,更利于教和学,这里不再一一列出。

(12) 解决了第1版在使用中发现的问题,改正了个别错误。

本书仍然立足大学本科生“数字信号处理”课程的教材。全书共有9章,即绪论、离散时间信号与系统的时域分析、离散时间信号与系统的频域分析、离散傅里叶变换(DFT)、快速傅里叶变换(FFT)、IIR数字滤波器的设计、FIR数字滤波器的设计、数字滤波器结构与有限字长效应、多采样率数字信号处理以及数字信号处理实验等。为便于读者学习,本书第1版已配套出版《数字信号处理原理及实现学习指导》一书,对于第2版新增加的内容,将尽快出版与第2版教材配套的学习指导书。

本书中所注明的MATLAB特殊函数均来源于Vinay K. Ingle和John G. Proakis开发的PWS_DSP工具箱,文中不再一一注明。

本书由王艳芬教授担任主编。绪论及第1、2、3、4、8章由王艳芬教授编写,第5、9章及附录由王刚副教授编写,第6章由张晓光副教授编写,第7章由刘卫东副教授编写。

限于编者水平,虽对第1版进行了修订,但肯定还会有许多不足之处,诚挚希望广大读者批评指正,以便今后不断改进。

编者

2013年1月

第 1 版前言

随着信息技术的飞速发展,数字信号处理理论和技术日益成熟,已成为一门重要的学科,并在各个领域得到广泛应用。“数字信号处理”基础知识已成为信息工程、电子科学与技术、电气自动化以及其他电类专业必须掌握的专业基础知识和必修内容。

本书共包括 8 章三部分内容,第一部分包括第 1、2、3、4 章,是数字信号处理的基础理论部分。鉴于离散时间信号与离散时间系统是数字信号处理中的两个最重要的概念,本书用两章内容分别从时域和频域两个方面对离散时间信号与系统进行了较详细的讨论。第 1 章介绍了离散时间信号与系统的时域分析方法、常系数线性差分方程和模拟信号数字处理方法。第 2 章对离散时间信号与系统进行了频域分析,介绍了序列的傅里叶变换(DTFT)和序列的 Z 变换等频域分析数学工具,讨论了系统函数、频率响应和零、极点分布等概念,并引出两类重要的数字滤波器系统。离散傅里叶变换(DFT)是数字信号处理中的核心内容,本书在第 3 章用较大篇幅讨论了 DFT 的定义、性质和物理意义,在此基础上引出了重要的频域采样理论,并且进一步讨论了 DFT 在实际中的典型应用。快速傅里叶变换(FFT)是 DFT 的一种快速算法,它在数字信号处理发展史上起到了里程碑的作用,本书第 4 章重点讨论了 FFT 的典型算法原理包括按时间、频率抽取的基 2FFT 和 IFFT 的高效算法,结合 DFT 的对称性讨论了实序列的 FFT 算法,最后介绍了线性调频 Z 变换(CZT)。数字滤波器是数字信号处理研究的重要内容,本书第二部分包括第 5、6、7 章,主要学习数字滤波器的基本理论和设计方法,包括无限脉冲响应(IIR)数字滤波器、有限脉冲响应(FIR)数字滤波器及其滤波器的网络结构等,第 5 章重点介绍了利用模拟滤波器设计 IIR 数字滤波器的原理、思路和方法包括脉冲响应不变法和双线性变换法,第 6 章则主要讨论了 FIR 滤波器具有线性相位的条件和特性以及常用的设计方法包括窗函数设计法、频率采样设计法和等波纹逼近法等,第 7 章介绍了这两类滤波器的基本网络结构和特点。第三部分包括第 8 章及附录,是本书的上机实验内容,包括必须掌握的基础实验和扩展掌握的交互式工具应用实验。

本书以数字信号处理基础知识、基本理论为主线,同时将学习和应用数字信号处理的极好工具 MATLAB 引入本书。为了突出基础知识并使基本概念通俗易懂,本书通过例题求解的方式引入 MATLAB 这一工具,在每一个重要概念讨论之后,都给出了 MATLAB 实现内容,以帮助读者较好地掌握 MATLAB 工具,并结合实际应用更好地掌握“数字信号处理”的知识点。本书列举了大量的例题和习题,并专门编写了上机实验一章,突出了理论和实践相结合的环节,并配有上机习题,它可以作为课程实验练习和上机考试的复习习题。

本书主要作为工科信息通信类本科高年级学生之用,着重基本概念、基本原理的阐述及

各概念之间的相互联系,并且针对课程抽象难学的特点,以 MATLAB 为主线来阐述重要概念和基本原理,并提供了 MATLAB 演示程序及与实际结合密切的综合性例题。

本书由王艳芬担任主编。绪论及第 1、2、3、4 章由王艳芬编写,第 5 章由王刚编写,第 6 章由张晓光编写,第 7 章由刘卫东编写,第 8 章由王艳芬和王刚共同编写。

限于编者水平,加上时间紧张,书中肯定存在不少问题和错误,诚挚希望广大读者批评指正。

编 者

2007 年 9 月

教学建议

教学内容	学习要点及教学要求	课时安排	
		全部讲授	部分选讲
绪 论	(1) 了解信号和系统的分类和特点,理解数字信号处理的基本概念和处理的实质;了解数字信号处理系统的基本组成和特点;掌握数字信号处理基本学科分支,理解数字信号处理(DSP)的两层含义;了解数字信号处理的四种实现方法以及应用领域; (2) 掌握本课程所要讲授的主要内容和知识模块:基础模块(第1、2章),数字频谱分析模块(第3、4章);数字滤波器模块(第5、6、7章),实验模块(第9章)。	1~2	1
第1章 离散时间信号与系统的时域分析	(1) 掌握常用基本序列的含义和表示方法; (2) 掌握线性时不变系统的特性以及因果性和稳定性的判断,掌握线性卷积的计算; (3) 了解线性常系数差分方程的解法; (4) 掌握模拟信号的数字处理方法。	4~5	4
第2章 离散时间信号与系统的频域分析	(1) 理解序列的傅里叶变换(DTFT)定义和基本性质; (2) 了解序列的Z变换的定义、收敛域和基本性质; (3) 掌握系统函数的定义和计算、与差分方程的关系、收敛域和系统的因果稳定性判别; (4) 掌握频率响应的物理意义、计算以及几何确定法。	5~6	5
第3章 离散傅里叶变换(DFT)	(1) 理解傅里叶变换的四种形式的意义; (2) 了解离散傅里叶级数(DFS)的定义、基本性质; (3) 掌握离散傅里叶变换(DFT)的定义、基本性质以及与Z变换和DTFT的关系,理解隐含周期性的意义,掌握圆周卷积的计算; (4) 掌握频域采样理论的意义、分析过程和结论; (5) 掌握DFT在计算线性卷积、线性相关和谱分析等方面的应用,了解重叠相加法和重叠保留法。	8~10	8
第4章 快速傅里叶变换(FFT)	(1) 了解直接计算DFT的问题及改进途径; (2) 掌握基2-FFT算法包括按时间抽取法(DIT-FFT)和按频率抽取法(DIF-FFT)的基本思路和算法特点; (3) 了解IDFT的高效算法,理解实序列的FFT算法; (4) 了解N为复合数的混合基FFT算法; (5) 了解线性调频Z变换(chirp Z变换)的基本原理、特点和实现过程。	4~6	4

续表

教学内容	学习要点及教学要求	课时安排	
		全部讲授	部分选讲
第5章 IIR 数字滤波器的设计	(1) 了解数字滤波器的基本概念、分类和技术指标； (2) 了解模拟滤波器的设计方法； (3) 掌握利用模拟滤波器设计数字滤波器的基本方法，包括脉冲响应不变法和双线性变换法设计； (4) 了解 IIR 数字高通、带通和带阻滤波器的设计方法； (5) 了解 IIR 数字滤波器的相位均衡概念。	6~8	6
第6章 FIR 数字滤波器的设计	(1) 了解两类线性相位的概念，掌握 FIR 数字滤波器线性相位条件的推导与证明； (2) 掌握相位条件 FIR 滤波器的幅度特点和零点特点； (3) 掌握窗函数法和频率采样法设计 FIR 数字低通滤波器的基本原理、步骤和实现； (4) 了解等波纹逼近法、简单整系数法设计 FIR 数字滤波器的方法； (5) 掌握 IIR 及 FIR 数字滤波器的比较。	6~8	6
第7章 数字滤波器结构与有限字长效应	(1) 了解数字滤波器的基本结构单元、信号流程图； (2) 掌握 IIR 滤波器的基本网络结构，包括直接型、级联型和并联型； (3) 掌握 FIR 滤波器的基本网络结构，包括直接型、级联型、频率采样结构和线性相位结构； (4) 了解数字滤波器的格型结构； (5) 了解有限字长效应的概念和基本处理方法。	4~6	4
第8章 多采样率数字信号处理	(1) 了解多采样率转换的意义； (2) 掌握序列的整数倍抽取与插值和有理倍数改变抽样率的基本概念、理论和方法； (3) 了解多采样率转换滤波器的高效结构等。	2~3	2
第9章 数字信号处理实验	(1) 掌握实验(1)、实验(2)和实验(3)的实验原理、方法、步骤和编程实现； (2) 了解实验(4)和实验(5)的实验原理、方法、步骤和编程实现。	8~10	8
	教学总学时建议	48~64	48

说明：(1) 本教材为信息工程、电子信息工程、通信工程、电子科学与技术、电气工程及其自动化、自动化、计算机科学与技术等专业课程教材，总学时数为 48~64 学时(含 8~10 学时实验)，不同专业根据不同的教学要求酌情对内容进行适当取舍。

(2) 本教材理论授课学时数中包含习题课、课堂讨论等必要的课内教学环节。

目 录

绪论	1
0.1 信号、系统与信号处理	1
0.2 数字信号处理系统的基本组成	2
0.3 数字信号处理的特点	3
0.4 数字信号处理基本学科分支	3
0.5 数字信号处理系统的实现方法	4
0.6 数字信号处理的应用领域	4
第 1 章 离散时间信号与系统的时域分析	6
1.1 引言	6
1.2 离散时间信号	6
1.2.1 序列的定义	6
1.2.2 常用基本序列	7
1.2.3 序列的基本运算	10
1.2.4 任意序列的单位脉冲序列表示	11
1.2.5 MATLAB 实现	11
1.3 离散时间系统	13
1.3.1 线性系统	14
1.3.2 时不变系统	14
1.3.3 线性时不变离散系统	15
1.3.4 线性卷积的计算	16
1.3.5 系统的因果性和稳定性	18
1.4 离散时间系统的时域描述——差分方程	20
1.4.1 常系数线性差分方程的一般表达式	20
1.4.2 差分方程的求解	20
1.4.3 MATLAB 实现	21
1.5 模拟信号数字处理方法	22
1.5.1 采样的基本概念	22
1.5.2 理想采样及其频谱	23
1.5.3 时域采样定理	24
1.5.4 采样的恢复	26

1.5.5 采样内插公式	27
1.5.6 MATLAB 实现	28
本章小结	29
习题	30
第2章 离散时间信号与系统的频域分析	34
2.1 序列的傅里叶变换的定义及性质	34
2.1.1 序列的傅里叶变换的定义	34
2.1.2 常用序列的傅里叶变换	35
2.1.3 序列的傅里叶变换的性质	36
2.1.4 MATLAB 实现	40
2.2 序列的 Z 变换	42
2.2.1 Z 变换的定义及其收敛域	42
2.2.2 序列特性对 Z 变换收敛域的影响	43
2.2.3 Z 反变换	47
2.2.4 MATLAB 实现	50
2.2.5 Z 变换的性质	51
2.3 系统函数与频率响应	55
2.3.1 系统函数的定义	55
2.3.2 系统函数和差分方程	56
2.3.3 系统函数的收敛域与系统的因果稳定性	57
2.3.4 频率响应	59
2.3.5 IIR 和 FIR 系统	65
2.3.6 MATLAB 实现	66
本章小结	69
习题	70
第3章 离散傅里叶变换	74
3.1 引言	74
3.2 傅里叶变换的几种形式	74
3.2.1 连续时间、连续频率——连续傅里叶变换(FT)	74
3.2.2 连续时间、离散频率——傅里叶级数(FS)	74
3.2.3 离散时间、连续频率——序列的傅里叶变换(DTFT)	75
3.2.4 离散时间、离散频率——离散傅里叶变换(DFT)	75
3.3 离散傅里叶级数(DFS)	76
3.3.1 DFS 的定义	76
3.3.2 DFS 的性质	78
3.4 离散傅里叶变换	79
3.4.1 DFT 的定义	79

3.4.2	DFT 和 Z 变换、DTFT 的关系	82
3.4.3	DFT 的性质	83
3.4.4	MATLAB 实现	88
3.5	频域采样理论——抽样 Z 变换	91
3.5.1	频域采样	91
3.5.2	频域恢复——频域内插公式	92
3.6	用 DFT 计算线性卷积和线性相关	95
3.6.1	线性卷积的 DFT 算法	95
3.6.2	线性相关的 DFT 算法	99
3.7	用 DFT 进行频谱分析	101
3.7.1	利用 DFT 对连续非周期信号进行谱分析	101
3.7.2	用 DFT 进行谱分析的误差问题	103
3.7.3	用 DFT 进行谱分析的参数考虑	106
3.7.4	MATLAB 实现	107
	本章小结	111
	习题	112
第 4 章	快速傅里叶变换	116
4.1	引言	116
4.2	直接计算 DFT 的问题及改进的途径	116
4.2.1	直接计算 DFT 的运算量问题	116
4.2.2	改善途径	117
4.3	按时间抽取(DIT)的基 2-FFT 算法	117
4.3.1	算法原理	117
4.3.2	DIT-FFT 算法与直接计算 DFT 运算量的比较	120
4.3.3	算法特点	121
4.4	按频率抽取(DIF)的基 2-FFT 算法	124
4.4.1	算法原理	124
4.4.2	算法特点	126
4.5	IDFT 的高效算法	127
4.5.1	利用 FFT 流程图计算 IFFT	127
4.5.2	直接调用 FFT 子程序的方法	128
4.6	实序列的 FFT 算法	128
4.7	N 为复合数的混合基 FFT 算法	130
4.7.1	算法的基本原理	130
4.7.2	N 为复合数时算法的运算量估计	133
4.8	线性调频 Z 变换(CZT)	134
4.8.1	算法基本原理	134
4.8.2	CZT 的实现	136

4.8.3	CZT 的特点	137
4.8.4	MATLAB 实现	138
	本章小结	140
	习题	140
第 5 章	IIR 数字滤波器的设计	142
5.1	引言	142
5.2	数字滤波器的基本概念	142
5.2.1	数字滤波原理	142
5.2.2	数字滤波器的分类	143
5.2.3	数字滤波器的技术指标	145
5.2.4	数字滤波器的设计方法	146
5.3	模拟滤波器的设计	147
5.3.1	模拟滤波器的技术指标要求	148
5.3.2	由幅度平方函数来确定传输函数	149
5.3.3	巴特沃思低通滤波器	150
5.3.4	切比雪夫低通滤波器	154
5.3.5	模拟滤波器的频率变换	160
5.4	脉冲响应不变法设计 IIR 数字滤波器	165
5.4.1	变换原理	165
5.4.2	s 平面与 z 平面的映射关系	166
5.4.3	混叠失真	168
5.4.4	优缺点	169
5.4.5	MATLAB 实现	169
5.5	双线性变换法设计 IIR 数字滤波器	172
5.5.1	变换原理	172
5.5.2	s 平面与 z 平面的映射关系	173
5.5.3	双线性变换法中的频率失真和预畸变	174
5.5.4	模拟滤波器的数字化方法	177
5.5.5	MATLAB 实现	177
5.6	IIR 数字滤波器的频率变换及 MATLAB 实现	178
5.7	IIR 数字滤波器的直接设计法	182
5.7.1	零、极点累试法	182
5.7.2	最小均方误差法	183
5.8	IIR 数字滤波器的相位均衡	185
5.8.1	全通滤波器的群时延特性	185
5.8.2	IIR 数字滤波器的群时延均衡	186
	本章小结	187
	习题	188

第 6 章 FIR 数字滤波器的设计	192
6.1 引言	192
6.2 线性相位 FIR 数字滤波器的特点	192
6.2.1 线性相位条件	192
6.2.2 幅度函数特点	195
6.2.3 线性相位 FIR 数字滤波器的零点位置	201
6.3 窗函数法设计 FIR 数字滤波器	202
6.3.1 设计方法	202
6.3.2 加窗对 FIR 数字滤波器幅度特性的影响	204
6.3.3 常用窗函数	206
6.3.4 一般设计步骤及 MATLAB 实现	212
6.4 频率采样法设计 FIR 数字滤波器	215
6.4.1 设计方法	215
6.4.2 线性相位滤波器的约束条件	216
6.4.3 逼近误差	217
6.4.4 过渡带采样的最优设计	218
6.4.5 一般设计步骤及 MATLAB 实现	219
6.5 等波纹逼近法设计 FIR 数字滤波器	222
6.5.1 等波纹逼近准则	223
6.5.2 线性相位 FIR 数字滤波器的设计	224
6.5.3 MATLAB 实现	226
6.6 简单整系数法设计 FIR 数字滤波器	228
6.6.1 设计方法	228
6.6.2 简单整系数 FIR 数字滤波器的优化设计	230
6.6.3 参数求解及 MATLAB 实现	231
6.7 FIR 和 IIR 数字滤波器的比较	233
本章小结	234
习题	235
第 7 章 数字滤波器结构与有限字长效应	238
7.1 引言	238
7.2 基本结构单元	239
7.3 IIR 滤波器的基本网络结构	240
7.3.1 直接型	240
7.3.2 级联型	242
7.3.3 并联型	245
7.3.4 全通系统	247
7.3.5 最小相位系统	248
7.4 FIR 滤波器的基本网络结构	250

7.4.1	直接型(卷积型)·····	250
7.4.2	级联型·····	251
7.4.3	频率采样结构·····	252
7.4.4	线性相位结构·····	257
7.5	数字滤波器的格型结构·····	259
7.5.1	全零点(FIR)系统的格型结构·····	259
7.5.2	全极点(IIR)系统的格型结构·····	262
7.5.3	极零系统的格型结构·····	263
7.6	有限字长效应·····	264
7.6.1	输入信号的量化效应·····	264
7.6.2	数字滤波器的系数量化效应·····	266
7.6.3	数字滤波器的运算量化效应·····	267
	本章小结·····	271
	习题·····	272
第8章	多采样率数字信号处理 ·····	274
8.1	引言·····	274
8.2	序列的整数倍抽取和插值·····	274
8.2.1	序列的整数倍抽取·····	274
8.2.2	序列的整数倍插值·····	277
8.3	有理倍数的采样率转换·····	279
8.4	多采样率转换滤波器的设计·····	281
8.4.1	直接型 FIR 滤波器结构·····	281
8.4.2	多相滤波器实现·····	283
8.5	多采样率转换滤波器的 MATLAB 实现·····	287
	本章小结·····	291
	习题·····	291
第9章	数字信号处理实验 ·····	295
9.1	实验开发工具 MATLAB 基础·····	295
9.1.1	MATLAB 语言·····	295
9.1.2	交互式仿真 Simulink·····	299
9.1.3	滤波器分析设计工具 FDATool·····	300
9.2	实验(1): FFT 频谱分析及应用·····	303
9.3	实验(2): IIR 数字滤波器的设计·····	305
9.4	实验(3): FIR 数字滤波器的设计·····	307
9.5	实验(4): 数字滤波器结构及 Simulink 仿真实现·····	309
9.6	实验(5): 立体声延时音效处理·····	312
9.7	上机习题·····	313
附录	傅里叶变换 ·····	319