



数字信号处理

陈绍荣 刘郁林 雷斌 李晓毅 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

数字信号处理

陈绍荣 刘郁林 雷斌 李晓毅 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

本书系统介绍了数字信号处理的基本理论、算法及实现以及有限字长效应分析和经典功率谱估计的基本方法。全书共分12章,主要包括连续时间信号与系统、离散时间信号与系统、Z变换、傅里叶变换、离散傅里叶级数、DFT、FFT、数字滤波器的结构与实现、有限字长效应的统计分析和经典功率谱估计等内容。每章配有精心设计的习题,书末统一给出了参考答案。

本书根据作者从事《数字信号处理》课程近20年的教学经验撰写而成,既确保了相关内容有机衔接、自成体系,又吸收了作者的研究成果和教学体会,包括傅里叶级数的一种证明方法、周期序列和连续时间非周期信号的频谱关系、实对称序列频谱分析的简洁方法、原序列概念、序列的不定求和概念及应用等全新内容,特别是给出了类似于牛顿—莱布尼兹公式的序列求和通用公式,为以统一形式严谨地分析离散时间系统奠定了坚实基础。

本书读者需具有线性代数、复变函数、随机过程等学科相关基础知识。本书结构合理、论述清晰、推理严谨、举例翔实,最大特点是便于自学,可作为理工科相关专业的高年级本科生和研究生教材,也可供从事相关领域工作的科技人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理 / 陈绍荣, 刘郁林, 雷斌编著. —北京: 国防工业出版社, 2016. 9
ISBN 978-7-118-10693-0

I. ①数… II. ①陈… ②刘… ③雷… III. ①数字信号处理 IV. ①TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 014303 号

※

国防工业出版社 出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司印刷

新华书店经售

*

开本 889×1194 1/16 印张 37 字数 1218 千字

2016 年 9 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 98.00 元

(本书如有印装错误, 我社负责调换)

国防书店: (010)88540777

发行邮购: (010)88540776

发行传真: (010)88540755

发行业务: (010)88540717

前 言

随着超大规模集成电路和计算机技术的飞速发展,为数字信号处理中许多算法的实现奠定了坚实基础,进一步推动了数字信号处理学科快速发展,在通信、雷达、遥控遥测、航空航天、生物医学、地质勘探、系统控制、故障诊断等领域得到了广泛应用。因此,许多高校将“数字信号处理”课程作为本科生的必修课程和研究生的学位课程。

我们从事“数字信号处理”课程教学近20年,通过对该课程教学的多年探索和实践总结,逐步构建形成了一套科学完整的课程框架结构。概括而言,就是“一个基础定理、两个应用落点、三种卷和运算、四类频谱特征、五种变换关系、六个对偶性质、七种设计方法、八个教学专题”的教学内容体系。

一个基础定理,就是以时域抽样定理为基础,派生出本课程涉及的主要内容;两个应用落点,就是将数字滤波器的设计和快速傅里叶变换的应用作为本课程的落脚点;三种卷和运算,包括线性卷和、周期卷和及圆周卷和的计算方法;四类频谱特征,是指连续时间周期信号频谱、连续时间非周期信号频谱、非周期序列频谱及周期序列频谱的定义及特征;五种变换关系,包括样值信号的拉普拉斯变换(LT)与傅里叶变换(CTFT)、样值序列的 Z 变换(ZT)与傅里叶变换(DTFT)、周期序列的离散傅里叶级数(DFS)及其相互关系;六个对偶性质,就是基于DFS的对称性,利用三步法可以演绎出与DFS时域性质相对偶的六个频域性质;七种设计方法,是指模拟滤波器设计的频率变换法、无限冲激响应(IIR)数字滤波器设计的单位冲激响应不变法、单位阶跃响应不变法及双线性变换法、有限冲激响应(FIR)数字滤波器设计的窗函数法、频率抽样法及切比雪夫逼近法;八个教学专题,主要包括序列及线性移不变(LSI)系统的时域分析、 Z 变换及LSI系统 Z 域分析、DTFT及序列的数字滤波;DFS和DFT的性质及定理、快速傅里叶变换(FFT)及应用、数字滤波器的结构与有限字长效应分析和经典功率谱估计。

在本书中,我们还结合教学经验充实完善了近年来对数字信号处理中一些问题的研究成果:一是从信号频谱关系的角度,给出了周期信号傅里叶级数的一种证明方法,解决了四类信号频谱的相互表出问题;二是基于序列运算关系,首次提出了原序列的概念,定义了序列的不定求和,用数学语言描述了后向差分的逆运算,给出了常用因果序列和反因果序列的不定求和公式,提出了形式统一的序列求和运算通用公式,不仅为我们深刻认识系统状态的产生、发展及演变过程奠定了坚实基础,而且为用多种方法分析求解线性移变系统和线性移不变系统的响应提供了严谨的依据;三是以信号的时域抽样为主要线索,导出了相应序列的 Z 变换(ZT)、DTFT、DFS和DFT,并揭示了DFS与CTFT的关系;四是基于序列卷和关系,提出了采用压扩限方式来实现周期卷和及圆周卷和的化归运算,给出了两种计算周期卷和及圆周卷和的方法。

2013年,我们承担的“数字信号处理”课程获得重庆市研究生教育优质课程建设立项,针对课程重难点内容,编著了《数字信号处理学习指南》一书,使用至今,教学效果和学生反馈良好。本书是以该学习指南为基础编著完成的,在编写中力争做到内容机理、基本概念、基本原理和基本方法等四个突出,确保结构合理、论述清晰、推理严谨,同时对例题和习题作了精心筛选和设计。本书最大特点是便于自学,可作为理工科相关专业的高年级本科生和研究生教材,也可供从事相关领域工作的科技人员参考。

全书结构和内容安排如下:

第1章介绍了数字信号处理的基本概念,包括模拟信号的数字化处理过程、数字信号处理系统的特点、数字信号处理的主要内容和数字信号处理课程的框架体系结构。

在第2章中,回顾了连续时间信号和连续时间系统分析的主要内容。本章针对后续章节知识点需求,仅对CTFT的性质及LT的主要性质作了介绍,而对系统复频域分析方法未作讨论。为解决知识脱节问题,特别增设了幂级数这一小节,以便引出欧拉公式,推证连续时间周期信号的傅里叶级数及连续时间非周期信号的傅里叶变换;给出了常用因果信号和反因果信号的原函数公式;给出了线性卷积的标尺性质、加权性质和交替加权性质。

在第3章中,介绍了离散时间信号和离散时间系统的时域分析方法。与传统内容和方法相比,在序列的运算部分,提出了原序列概念,定义了序列的不定求和,即后向差分的逆运算;给出了常用因果序列和反因果序列的不定求和公式;给出了插值序列、抽取序列和重排序列的线性卷和性质;给出了一个类似于牛顿—莱布尼兹公式的序列求和通用公式,为以统一形式严谨地分析离散时间系统奠定了坚实基础。在离散时间系统分析部分,将原序列概念和降阶方法相结合,利用不定求和降阶法和上限求和降阶法,求解了高阶线性移变系统和线性移不变系统的响应。此外,还对序列的内积和相关函数概念进行了介绍,以便为第12章的经典功率谱估计打下基础。

在第4章中,介绍了离散时间信号和离散时间系统的 Z 域分析方法。与传统内容和方法相比,一是讨论了序列插值、抽取和重排前后的 Z 变换关系;二是揭示了样值信号与原始信号的双边拉普拉斯变换的关系,并利用此关系从非周期信号的拉普拉斯逆变换导出了逆 Z 变换,详细讨论了 S 平面与 Z 平面的映射关系,为第9章IIR数字滤波器的双线性变换设计法的提出奠定了基础;三是增设了线性移变系统的 Z 域分析这个知识点,介绍了两种新方法,即利用连续时间信号的拉普拉斯变换计算相应序列 Z 变换的方法和周期序列作用于线性移不变系统的间接 Z 域分析方法。

在第5章中,介绍了离散时间信号和离散时间系统的频域分析方法,包括DTFT的性质及定理和数字滤波,全通系统和最小相位系统的条件、最小相位系统的性质、希尔伯特变换及性质。与传统内容和方法相比:一是讨论了序列插值、抽取和重排的DTFT变换关系,为第10章中构建插值滤波器和重排滤波器的实现结构奠定了基础;二是揭示了序列的频谱(DTFT)与相应连续时间信号的频谱(CTFT)之间的线性卷积关系;三是增加了DTFT的频域积分性质;四是深刻揭示了序列的 ZT 与DTFT的相互表出关系,并针对因果序列和反因果序列的 ZT 在 Z 平面单位圆周上存在单极点和重极点的情况,给出了 ZT 与DTFT的相互计算方法。

在第6章中,详细讨论了离散傅里叶级数和离散傅里叶变换。与传统内容和方法相比:一是从三种途径导出了周期序列的DFS,其目的是揭示出周期序列和相应非周期序列、连续时间周期信号以及连续时间非周期信号之间的频谱关系;二是增加了两个DFS及DFT的性质,即时域周期差分性质与时域圆周差分性质、频域周期差分性质与频域圆周差分性质;三是揭示了周期序列通过线性移不变系统时,零状态响应的周期卷和与线性卷和的等价性;四是以统一形式研究了有限长序列的 ZT 、DTFT及DFT之间的相互表出问题。

在第7章中,介绍了DFT的快速算法即FFT。对Goertzel算法、按时间抽取(DIT)的基2FFT算法、按频率抽取(DIF)的基2FFT算法、频率抽取基4FFT算法及分裂基算法进行了详细推导,并详细讨论了各种算法特别是分裂基算法的运算量。与传统内容相比:一是从一般意义上讨论了圆周卷和代替线性卷和应具备的条件;二是用数学语言对重叠相加法中重叠点数的长度进行了分析,构造了新的序列,引出了重叠舍去法;三是给出了线性自相关函数的FFT算法原理。

在第8章中,介绍了IIR数字滤波器和FIR数字滤波器的实现结构,包括IIR数字滤波器的卡尔曼结构、级联型结构和并联型结构,FIR数字滤波器的直接型结构、级联型结构、频率抽样型结构及线性相位FIR数字滤波器的线性相位型结构。此外,还详细分析了IIR数字滤波器和FIR数字滤波器的Lattice结构,并给出了参数的计算方法。

在第9章中,介绍了模拟滤波器和IIR数字滤波器的设计方法,包括:基于模拟低通滤波器,利用频率变换设计模拟高通滤波器、模拟带通滤波器和模拟带阻滤波器的方法;IIR数字滤波器设计的单位冲激响应不变法、阶跃响应不变法和双线性变换法;基于频率变换、数字低通滤波器、逆频率变换和双线性变换设计数字高通滤波器、数字带通滤波器和数字带阻滤波器的方法。与传统方法相比:一是在单位冲激响应不变法中,给出了一种直接利用模拟滤波器转移函数确定数字滤波器转移函数的方法;二是基于样值信号与原始信号的双边拉普拉斯变换关系,揭示了单位冲激响应不变法中数字滤波器与模拟滤波器极点之间的映射关系,分析了产生频谱混叠的原因,从而引出了IIR数字滤波器的双线性变换法。

在第10章中,介绍了FIR数字滤波器的设计方法,包括线性相位FIR数字低通、数字高通、数字带通、数字带阻滤波器的窗函数设计法和频率抽样设计法以及FIR数字滤波器设计的切比雪夫逼近法。与传统方法相比:一是提出了一种分析实对称序列频谱的简洁方法;二是揭示了线性相位理想数字滤波器幅度序列的特征;三是提出了插值滤波器和重排滤波器的等长分段实现结构。

在第11章中,介绍了数字信号处理中有限字长效应的统计分析,包括:随机变量及随机变量函数的数字特征,平稳随机序列的统计特性;定点运算中的截尾误差和舍入误差的统计分析,量化误差通过线性移不变系统的统计分析,IIR数字滤波器及FIR数字滤波器系数量化的统计分析,IIR数字滤波器、FIR数字滤波器、DFT运算及FFT运算中乘法舍入误差的统计分析等内容。对二阶IIR数字滤波器中乘法运算舍入处理时所引起的零输入极限环振荡现象以及补码加法运算溢出时所引起的零输入溢出极限环振荡现象进行了详细分析,此外,还对二阶IIR数字滤波器输出的噪声信号比值及其变化的动态范围进行了详细分析。与传统内容相比,增设了定点运算中线性相位FIR数字滤波器的线性相位型结构舍入量化误差的统计分析。

在第12章中,介绍了经典功率谱估计,包括:平稳随机序列的各态历经性及其功率谱;平稳随机序列参数的线性均方估计;自相关函数的直接估计;经典功率谱估计的周期图法、自相关法及周期图法的改进方法等。与传统内容相比:一是增设了正态随机序列一节,介绍了多维正态随机变量及其线性变换、平稳正态随机序列,旨在导出零均值正态平稳随机序列的四阶混合矩计算公式;二是给出了直接估计自相关函数的四个等价表达式,为分析自相关函数直接估计的质量奠定了基础。

本书第1章至第8章由陈绍荣副教授编写,第9章由李晓毅教授编写,第10章由雷斌教授编写,第11章、第12章由刘郁林教授编写。全书由陈绍荣副教授统稿和审校。

本书得到重庆市“研究生教育优质课程建设——数字信号处理”项目(No. 61, 2013)、教育部“新世纪优秀人才”支持计划(No. NCET-11-0873)、重庆“高校创新团队”建设计划(No. KJTD201343)等资助,在编写过程中得到了国防科技大学罗鹏飞教授、重庆通信学院陈兆海院长(教授)、朱桂斌教授、柏森教授、吴乐华教授、钱林杰教授、胡绍兵副教授、张振宇副教授、陈代国副教授、徐舜讲师、朱行涛讲师、王开讲师及李元伟讲师的帮助,重庆通信学院训练部教保科张建新参谋对本书的出版给予了大力支持。在此对上述机构、部门、同事、出版社的编辑及参考文献的作者,尤其是支持和关心编著者的亲人,一并表示感谢。

我们的愿望是写一本便于阅读的书,尽管我们一直努力这么做,但由于水平有限,不妥和错误之处在所难免,恳切希望读者和专家批评指正。

编著者

2015年6月8日

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 模拟信号的数字化处理过程	1
1.2 数字信号处理系统的特点	1
1.3 数字信号处理涉及的主要内容	2
1.4 数字信号处理课程的框架体系结构	3
1.5 习题	4
第 2 章 连续时间信号与连续时间系统	5
2.1 信号的分类	5
2.1.1 连续时间信号与离散时间信号	5
2.1.2 周期信号与非周期信号	5
2.1.3 能量信号与功率信号	5
2.2 单位阶跃信号和单位冲激信号	6
2.2.1 单位阶跃信号的定义及波形	6
2.2.2 利用单位阶跃信号定义其他连续时间信号	6
2.2.3 单位冲激信号的定义及波形	6
2.2.4 单位冲激信号与单位阶跃信号的关系	7
2.2.5 单位冲激信号的性质	7
2.3 连续时间信号的分解和连续时间信号的运算	8
2.3.1 连续时间实信号的幂级数展式	8
2.3.2 连续时间实信号的奇偶分解	9
2.3.3 实信号分解成延时冲激信号的加权和	10
2.3.4 连续时间复信号的分解	10
2.3.5 连续时间信号的微分运算和积分运算	11
2.3.6 常用连续时间因果信号和反因果信号的不定积分公式	12
2.3.7 线性卷积运算	12
2.3.8 线性卷积的性质	12
2.3.9 信号的内积	16
2.3.10 信号的相关函数	16
2.4 傅里叶级数与傅里叶变换	17
2.4.1 连续时间周期信号的傅里叶级数	17
2.4.2 连续时间周期信号的功率——Parseval 定理	19
2.4.3 连续时间非周期信号的傅里叶变换	19
2.4.4 连续时间非周期信号的频谱与相应周期信号频谱的关系	21
2.4.5 连续时间非周期信号傅里叶变换的性质	21
2.5 连续时间信号的拉普拉斯变换	26
2.5.1 连续时间信号的拉普拉斯变换	26
2.5.2 连续时间信号拉普拉斯变换的收敛域	27

2.5.3	连续时间信号拉普拉斯变换的主要性质	29
2.6	连续时间系统	32
2.6.1	连续时间系统的分类	32
2.6.2	线性时不变系统输出与输入的关系	33
2.6.3	线性时不变因果系统应具备的时域充要条件	33
2.6.4	线性时不变稳定系统应具备的时域充要条件	34
2.6.5	线性时不变连续时间系统的极点分布与系统时域特性的关系	34
2.6.6	线性时不变连续时间系统的稳定性判据	36
2.6.7	连续时间系统的信号流图和 Mason 规则	36
2.6.8	连续时间稳定系统的频率特性	38
2.7	抽样定理	40
2.8	希尔伯特变换	42
2.9	线性时不变因果稳定全通系统和因果稳定最小相位系统	46
2.9.1	线性时不变因果稳定全通系统应具备的条件	46
2.9.2	线性时不变因果稳定最小相位系统的性质	47
2.10	习题	49
第 3 章	离散时间信号与离散时间系统	52
3.1	离散时间信号	52
3.2	常用序列	52
3.2.1	单位阶跃序列	52
3.2.2	单位冲激序列	53
3.2.3	符号序列	53
3.2.4	矩形序列	53
3.2.5	周期序列	53
3.2.6	复指数序列	54
3.3	序列运算和序列的分解	55
3.3.1	单个序列的运算	55
3.3.2	两个序列的运算	58
3.3.3	线性卷和的性质	61
3.3.4	周期序列的卷和	66
3.3.5	实序列的分解	67
3.3.6	复序列的分解	67
3.4	序列的内积和相关函数	69
3.4.1	序列的内积	69
3.4.2	相关系数	71
3.4.3	相关函数	72
3.4.4	相关函数的性质	74
3.4.5	常用相关函数	74
3.5	差分方程及其解结构	75
3.5.1	差分方程的有关术语	75
3.5.2	线性变系数非齐次差分方程的通解	75
3.5.3	线性常系数齐次差分方程的通解	78
3.5.4	线性常系数非齐次差分方程的通解	80
3.6	离散时间系统	80
3.6.1	离散时间系统的描述	80

3.6.2	离散时间系统的分类	80
3.6.3	线性移不变系统的性质	82
3.6.4	线性移不变因果系统应具备的时域充要条件	83
3.6.5	线性移不变因果稳定系统应具备的时域充要条件	84
3.6.6	线性移不变系统的时域分析	84
3.6.7	线性移不变系统的转移算子	87
3.6.8	线性移不变系统的零输入响应	90
3.6.9	线性移不变系统的单位冲激响应	93
3.6.10	线性移不变系统的零状态响应	97
3.6.11	无时限指数序列通过线性移不变系统的零状态响应	99
3.6.12	周期序列通过线性移不变系统的零状态响应	100
3.7	习题	102
第4章	序列的Z变换	104
4.1	样值信号的拉普拉斯变换	104
4.2	序列的 Z 变换	104
4.2.1	序列的 Z 变换的导出	104
4.2.2	Z 变换的收敛域	105
4.2.3	Z 平面与 S 平面的映射关系	107
4.2.4	序列的 Z 变换与连续时间信号拉普拉斯变换的关系	108
4.2.5	利用连续时间信号的双边拉普拉斯变换确定序列的双边 Z 变换	108
4.3	Z 变换的性质	110
4.3.1	位移性质	110
4.3.2	线性性质	111
4.3.3	时域加权性质	112
4.3.4	时域共轭性质	112
4.3.5	时域插值性质	113
4.3.6	时域抽取性质	115
4.3.7	时域重排性质	115
4.3.8	时域线性卷和定理	116
4.3.9	时域差分性质	117
4.3.10	时域累加性质	117
4.3.11	Z 域卷积定理	118
4.3.12	Z 域微分性质	120
4.3.13	Z 域积分性质	121
4.3.14	始值定理	122
4.3.15	终值定理	123
4.3.16	线性相关定理	124
4.4	逆 Z 变换	125
4.4.1	部分分式展开法	125
4.4.2	幂级数展开法(长除法)	126
4.4.3	留数法	127
4.5	线性移变系统的 Z 域分析	129
4.6	线性移不变系统的 Z 域分析	131
4.6.1	线性移不变系统的 Z 域描述	131
4.6.2	线性移不变系统的 Z 域分析	132

4.6.3	线性移不变系统的极点分布与系统时域特性的关系	137
4.6.4	线性移不变系统的稳定性判据	138
4.6.5	线性移不变系统的模拟框图和信号流图	140
4.7	习题	143
第5章	序列的傅里叶变换	145
5.1	非周期序列的傅里叶变换	145
5.1.1	非周期序列的傅里叶变换的导出	145
5.1.2	非周期序列的傅里叶变换存在的充分条件	146
5.1.3	非周期序列的傅里叶变换与连续非周期信号的傅里叶变换的关系	146
5.1.4	非周期序列的傅里叶变换与连续时间样值信号的傅里叶变换的关系	147
5.2	非周期序列的傅里叶变换的性质	148
5.2.1	线性性质	148
5.2.2	共轭对称性质	148
5.2.3	位移性质	151
5.2.4	时域插值性质	151
5.2.5	时域抽取性质	152
5.2.6	时域重排性质	154
5.2.7	时域线性卷和定理	155
5.2.8	时域差分性质	157
5.2.9	时域累加性质	157
5.2.10	频域周期卷积定理	159
5.2.11	频移性质	161
5.2.12	调制性质	164
5.2.13	频域微分性质	164
5.2.14	频域积分性质	166
5.2.15	线性相关定理	166
5.3	非周期序列傅里叶变换与 Z 变换的关系	167
5.3.1	由非周期序列的 Z 变换确定其傅里叶变换	167
5.3.2	由非周期序列的傅里叶变换确定其 Z 变换	171
5.4	离散时间系统的频率特性	172
5.4.1	线性移不变系统的频率特性	172
5.4.2	常用离散时间系统的频率特性	173
5.4.3	离散时间系统频率特性的几何作图方法	174
5.4.4	离散时间系统零、极点分布对相频特性的影响	175
5.5	离散时间系统的频域分析	177
5.6	序列的希尔伯特变换	180
5.6.1	序列的希尔伯特变换	180
5.6.2	序列的希尔伯特变换的性质	181
5.6.3	解析序列	183
5.7	因果序列频谱的实部与虚部的约束关系	185
5.7.1	因果复序列频谱的实部与虚部的约束关系	185
5.7.2	因果实序列频谱的实部与虚部的约束关系	186
5.8	线性移不变因果稳定全通系统和因果稳定最小相位系统	189
5.8.1	线性移不变因果稳定全通系统应具备的条件	189
5.8.2	线性移不变因果稳定最小相位系统的性质	190

5.9 习题	195
第 6 章 离散傅里叶级数和离散傅里叶变换	197
6.1 有限长序列与周期序列的关系	197
6.1.1 非周期序列与周期序列的关系	197
6.1.2 有限长序列与周期序列的关系	197
6.2 导出周期序列傅里叶级数的各种途径	197
6.2.1 利用 CTFS 导出 DFS	198
6.2.2 利用周期冲激序列的傅里叶级数导出 DFS	199
6.2.3 利用 DTFT 的频域抽样导出 DFS	199
6.2.4 周期序列的频谱与相应非周期序列的频谱的关系	200
6.2.5 周期序列的频谱与相应非周期序列的 Z 变换的关系	200
6.2.6 周期序列的频谱与相应连续时间周期信号的频谱的关系	200
6.2.7 周期序列的频谱与相应连续时间非周期信号的频谱的关系	201
6.3 常用周期序列的傅里叶级数	201
6.3.1 周期矩形序列的傅里叶级数展开式	201
6.3.2 周期余弦序列及周期正弦序列的傅里叶级数展开式	201
6.4 离散傅里叶变换	202
6.4.1 离散傅里叶变换的定义	202
6.4.2 离散傅里叶逆变换的另一种形式	202
6.4.3 离散傅里叶级数与离散傅里叶变换的关系	203
6.5 DFS 与 DFT 的性质	203
6.5.1 线性性质	203
6.5.2 时域周期位移性质与时域圆周位移性质	204
6.5.3 时域反褶性质	204
6.5.4 共轭对称性质	205
6.5.5 对称性质	209
6.5.6 时域周期卷和定理与时域圆周卷和定理	210
6.5.7 时域周期差分性质与时域圆周差分性质	211
6.5.8 时域周期求和性质与时域圆周求和性质	212
6.5.9 频域周期卷和定理与频域圆周卷和定理	213
6.5.10 频域周期位移性质与频域圆周位移性质	215
6.5.11 频域周期差分性质与频域圆周差分性质	215
6.5.12 频域周期求和性质与频域圆周求和性质	216
6.5.13 周期互相关定理与圆周互相关定理	218
6.6 离散傅里叶级数分析法	219
6.6.1 零状态响应的周期卷和与线性卷和的等价性	219
6.6.2 周期正弦序列通过 LSI 稳定系统的保频性	219
6.6.3 时域分析与频域派生	220
6.6.4 离散傅里叶级数分析法	221
6.7 有限长序列的 ZT、DTFT 及 DFT 的相互表示	222
6.7.1 利用有限长序列的 DTFT 表示 ZT 及 DFT	222
6.7.2 利用有限长序列的 ZT 表示 DTFT 及 DFT	223
6.7.3 利用有限长序列的 DFT 表示 ZT 及 DTFT	224
6.8 利用 DFT 逼近 CTFT	225
6.8.1 信号的时宽—带宽的约束关系	226

6.8.2	时域序列补零等价于其 DFT 进行插值	226
6.8.3	利用 DFT 逼近 CTFT 存在的问题	227
6.8.4	利用 DFT 逼近 CTFT 时参数选择的一般原则	231
6.9	习题	232
第 7 章	快速傅里叶变换	234
7.1	概述	234
7.2	直接计算 DFT 存在的问题及改进的途径	234
7.2.1	直接计算 DFT 存在的问题	234
7.2.2	改进的途径	235
7.3	Goertzel 算法	235
7.3.1	将 DFT 运算化为线性卷和运算	235
7.3.2	Goertzel 算法的推导	236
7.3.3	算法的讨论	237
7.4	按时间抽取(DIT)的基 2 FFT 算法	239
7.4.1	算法的推导	239
7.4.2	算法的讨论	242
7.5	按频率抽取(DIF)的基 2 FFT 算法	244
7.5.1	算法的推导	244
7.5.2	算法的讨论	249
7.6	进一步减少运算量的措施	251
7.6.1	多类蝶形单元算法	251
7.6.2	旋转因子的生成	252
7.6.3	实输入数据的 FFT 算法	253
7.7	按频率抽取基 4FFT 算法	254
7.7.1	算法的推导	254
7.7.2	算法的讨论	257
7.8	分裂基算法	259
7.8.1	算法的推导	259
7.8.2	算法的讨论	263
7.9	线性卷和与线性相关的 FFT 算法	266
7.9.1	圆周卷和代替线性卷和的条件	266
7.9.2	重叠相加法	267
7.9.3	重叠舍去法	269
7.9.4	线性相关的 FFT 算法	270
7.10	线性调频 Z 变换(CZT)	272
7.10.1	CZT 的定义	272
7.10.2	CZT 的计算步骤	273
7.10.3	CZT 的计算方法	273
7.11	习题	275
第 8 章	数字滤波器的结构	277
8.1	数字滤波器结构的表示方法	277
8.1.1	IIR 数字滤波器卡尔曼结构的信号流图	277
8.1.2	FIR 数字滤波器直接型结构的信号流图	278
8.2	线性相位 FIR 数字滤波器的零点分布特征	278

8.2.1	线性相位条件	278
8.2.2	线性相位 FIR 数字滤波器零点分布特征	279
8.3	IIR 数字滤波器的基本结构	279
8.3.1	IIR 数字滤波器的级联型结构	280
8.3.2	IIR 数字滤波器的并联型结构	281
8.4	FIR 数字滤波器的基本结构	281
8.4.1	FIR 数字滤波器的级联型结构	282
8.4.2	FIR 数字滤波器的频率抽样型结构	282
8.4.3	线性相位 FIR 数字滤波器的线性相位型结构	282
8.5	FIR 数字滤波器和 IIR 数字滤波器的 Lattice 结构	283
8.5.1	FIR 数字滤波器的 Lattice 结构	283
8.5.2	IIR 数字滤波器的 Lattice 结构	286
8.6	IIR 数字滤波器和 FIR 数字滤波器的比较	292
8.7	习题	292

第 9 章 无限冲激响应数字滤波器的设计 295

9.1	数字滤波器的基本概念	295
9.1.1	数字滤波器的技术指标	295
9.1.2	数字滤波器的幅频特性	296
9.1.3	数字滤波器的设计步骤	297
9.2	模拟滤波器的设计	297
9.2.1	概述	297
9.2.2	巴特沃斯模拟低通滤波器的设计	299
9.2.3	切比雪夫 I 型模拟低通滤波器的设计	301
9.2.4	模拟高通滤波器的设计	307
9.2.5	模拟带通滤波器的设计	309
9.2.6	模拟带阻滤波器的设计	311
9.3	用单位冲激响应不变法设计 IIR 数字低通滤波器	314
9.3.1	变换原理	314
9.3.2	混叠失真	314
9.3.3	模拟滤波器的数字化方法	315
9.3.4	用单位冲激响应不变法设计数字滤波器的优、缺点	318
9.3.5	造成频谱混叠的根本原因	318
9.4	用单位阶跃响应不变法设计 IIR 数字低通滤波器	319
9.4.1	变换原理	320
9.4.2	混叠失真	320
9.4.3	模拟滤波器的数字化方法	320
9.5	用双线性变换设计 IIR 数字低通滤波器	322
9.5.1	双线性变换式的导出	322
9.5.2	变换常数的选择	323
9.5.3	逼近情况	324
9.5.4	用双线性变换法设计 IIR 数字低通滤波器的优、缺点	324
9.5.5	用双线性变换法设计 IIR 数字低通滤波器的步骤	325
9.6	IIR 数字高通滤波器的设计	328
9.6.1	用双线性变换法设计 IIR 数字高通滤波器的过程	328
9.6.2	用双线性变换法设计 IIR 数字高通滤波器的步骤	329

9.7	IIR 数字带通滤波器的设计	331
9.7.1	用双线性变换法设计 IIR 数字带通滤波器的过程	331
9.7.2	用双线性变换法设计 IIR 数字带通滤波器的步骤	332
9.8	IIR 数字带阻滤波器的设计	336
9.8.1	用双线性变换法设计 IIR 数字带阻滤波器的过程	336
9.8.2	用双线性变换法设计 IIR 数字带阻滤波器的步骤	336
9.9	习题	341
第 10 章	有限冲激响应数字滤波器的设计	343
10.1	线性相位数字滤波器幅度函数的特点	343
10.1.1	线性相位的概念	343
10.1.2	偶对称的线性相位数字滤波器幅度函数的特点	344
10.1.3	奇对称的线性相位数字滤波器幅度函数的特点	345
10.2	窗函数设计法	347
10.2.1	窗函数对理想数字低通滤波器幅频特性的影响	347
10.2.2	逼近的效果	353
10.2.3	窗函数设计法存在的主要问题	353
10.3	各种窗函数	354
10.3.1	三角形窗	354
10.3.2	汉宁窗	356
10.3.3	海明窗	357
10.3.4	布拉克曼窗	357
10.3.5	凯塞窗	358
10.4	FIR 数字滤波器的窗函数设计法举例	360
10.4.1	FIR 数字低通滤波器的窗函数设计法	361
10.4.2	FIR 数字高通滤波器的窗函数设计法	362
10.4.3	FIR 数字带通滤波器的窗函数设计法	364
10.4.4	FIR 数字带阻滤波器的窗函数设计法	367
10.4.5	FIR 数字陷波器的窗函数设计法	370
10.5	FIR 数字滤波器设计的频率抽样法	371
10.5.1	FIR 数字滤波器频率抽样设计法的基本原理	371
10.5.2	FIR 数字低通滤波器设计的频率抽样法	377
10.5.3	FIR 数字高通滤波器设计的频率抽样法	380
10.5.4	FIR 数字带通滤波器设计的频率抽样法	382
10.5.5	FIR 数字带阻滤波器设计的频率抽样法	385
10.5.6	FIR 数字陷波器设计的频率抽样法	387
10.6	FIR 数字滤波器设计的切比雪夫逼近法	391
10.6.1	四种线性相位 FIR 数字滤波器幅度函数的统一表示	391
10.6.2	数值逼近的三种方法	394
10.6.3	切比雪夫最佳一致逼近原理	394
10.6.4	利用切比雪夫逼近理论设计 FIR 数字滤波器	396
10.6.5	误差幅度函数的极值特性	399
10.7	平均滤波器和梳状滤波器	401
10.7.1	平均滤波器	401
10.7.2	梳状滤波器	402
10.8	L/M 倍的抽样率转换器及其实现结构	405

10.8.1	L/M 倍的抽样率转换器	405
10.8.2	等价系统和多相分解	409
10.8.3	插值滤波器的实现结构	411
10.8.4	重排滤波器的实现结构	414
10.8.5	L/M 倍的抽样率转换器的实现结构	416
10.9	习题	418
第 11 章	数字信号处理中有限字长效应分析	420
11.1	随机变量及其统计特性	420
11.1.1	随机变量的定义	420
11.1.2	随机变量的分布函数和概率密度	421
11.1.3	多维随机变量的分布函数和概率密度	421
11.1.4	随机变量的数字特征	422
11.1.5	随机变量函数的数字特征	425
11.1.6	随机变量的特征函数	426
11.1.7	复随机变量及其统计特性	429
11.2	随机过程的统计特性	430
11.2.1	随机过程的基本概念	430
11.2.2	随机过程的统计描述及数字特征	431
11.2.3	平稳随机过程	433
11.2.4	随机序列的统计描述和数字特征	434
11.2.5	平稳随机序列及其统计特性	437
11.3	量化误差的统计分析	441
11.3.1	截尾误差和舍入误差	441
11.3.2	截尾误差和舍入误差的取值范围	441
11.3.3	截尾误差和舍入误差的统计分析	442
11.3.4	信号的量化模型	444
11.4	量化误差通过线性移不变系统的统计分析	445
11.4.1	舍入误差通过线性移不变系统的统计分析	445
11.4.2	截尾误差通过线性移不变系统的统计分析	446
11.5	IIR 数字滤波器系数量化的统计分析	447
11.5.1	IIR 数字滤波器系数量化的等效模型	447
11.5.2	IIR 数字滤波器系数舍入量化对频率特性的影响	448
11.6	FIR 数字滤波器系数量化的统计分析	450
11.6.1	FIR 数字滤波器系数量化的等效模型	450
11.6.2	FIR 数字滤波器系数舍入量化对幅度函数的影响	451
11.7	乘法运算舍入误差对系统性能影响的统计分析	453
11.7.1	IIR 数字滤波器零输入极限环振荡现象	453
11.7.2	乘法舍入误差的时域线性统计模型	455
11.7.3	确定高阶 IIR 数字滤波器零输入极限环振荡幅度的方法	456
11.7.4	IIR 数字滤波器零输入溢出极限环振荡现象	459
11.7.5	IIR 数字滤波器中乘法舍入误差的统计分析	461
11.7.6	FIR 数字滤波器中乘法舍入误差的统计分析	477
11.8	DFT 运算及 FFT 运算中乘法舍入误差的统计分析	486
11.8.1	DFT 运算中乘法舍入误差的统计分析	486
11.8.2	FFT 运算中乘法舍入误差的统计分析	488

11.9 习题	493
第 12 章 经典功率谱估计	497
12.1 正态随机序列	497
12.1.1 二维正态随机变量	497
12.1.2 多维正态随机变量	499
12.1.3 正态随机变量的线性变换	500
12.1.4 正态随机序列	502
12.1.5 平稳正态随机序列	503
12.2 平稳随机序列的各态历经性	505
12.3 具有各态历经性的平稳随机序列的功率谱	506
12.3.1 随机序列的功率谱	507
12.3.2 平稳随机序列的功率谱	508
12.3.3 具有各态历经性的平稳随机序列的功率谱	510
12.3.4 具有各态历经性的平稳随机序列功率谱的应用	510
12.4 平稳随机序列通过线性移不变因果稳定系统	512
12.5 平稳随机序列参数的线性均方估计	514
12.5.1 参数估计的概念	514
12.5.2 平稳随机序列参数估计的质量标准	515
12.5.3 平稳随机序列参数的线性均方估计	516
12.6 自相关函数的直接估计	519
12.6.1 自相关函数的直接估计及其估计质量	519
12.6.2 自相关函数的直接估计的快速计算	523
12.7 经典功率谱估计的周期图法	525
12.7.1 周期图法的估计原理	525
12.7.2 周期图法的估计质量	526
12.7.3 周期图法的方差性能较差的原因	531
12.7.4 数据窗对估计性能的影响	532
12.8 经典功率谱估计的自相关法	532
12.8.1 自相关法的估计原理	532
12.8.2 周期图法和自相关法的关系	533
12.8.3 利用自相关函数的对称性计算功率谱估计	534
12.8.4 自相关法的估计质量	535
12.8.5 实现自相关法的两种途径	540
12.9 基于周期图法的改进方法	543
12.9.1 Bartlett 法	543
12.9.2 Welch 法	547
12.9.3 Nuttall 法	552
12.10 习题	558
习题参考答案	560
参考文献	575

第1章 绪论

数字信号处理学科是随着半导体器件和计算机技术的发展而出现的,它将数字或符号表示的序列,通过计算机或专用的硬件处理设备,用数字的方式去处理,以得到人们所要求的信号形式。例如,对信号滤波,选择了信号的有用分量,而抑制了无用分量;或是估计信号的特征参数。总之,数字信号处理的内容丰富多彩,凡是用数字的方式对信号进行滤波、变换、估计和识别等,都是数字信号处理研究的对象。

1.1 模拟信号的数字化处理过程

对于模拟信号的数字化处理,首先将模拟信号变换成数字信号,然后用数字技术进行处理,最后再还原成模拟信号,如图 1.1.1 所示。

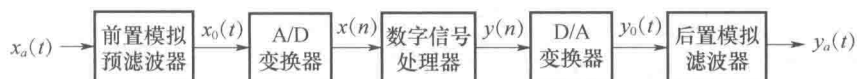


图 1.1.1 模拟信号的数字化处理原理框图

前置模拟预滤波器,又称为抗混叠滤波器,其作用是滤除 $x_a(t)$ 中高于折叠频率(抽样频率一半的频率)的分量,获得模拟信号 $x_0(t)$ 。

A/D 变换器,即模数变换器。其作用是将模拟信号变换成为数字信号,A/D 变换器由抽样、量化和编码三部分组成。即每隔 T (抽样间隔)取出一次模拟信号 $x_0(t)$ 的幅度,得到样值信号 $x_0(nT)$,其中 n 为整数,称样值信号 $x_0(nT)$ 为离散时间信号,再经量化和编码后,得到数字信号 $x(n)$ 。一般采用有限位的二进制码来表示离散时间信号的幅度,如 8 位码只能表示 $2^8=256$ 种不同的量化电平。当离散时间信号的幅度与量化电平不相同,通常采用截尾处理或舍入处理,用最接近的一个电平来表示离散时间信号的幅度。因此,模拟信号 $x_0(t)$ 经 A/D 变换器后,不仅时间上量化了,而且信号的幅度也量化了,从而得到了数字信号。其实,数字信号是数的序列,每一个数都是用一个有限的二进制码来表示的。

数字信号处理器的作用是按照预定的要求,对输入序列 $x(n)$ 进行加工处理,形成所需要的响应序列 $y(n)$ 。

D/A 变换器,即数模变换器。其作用是将数字信号 $y(n)$ 变换成为模拟信号 $y_0(t)$,而 $y_0(t)$ 在 $t=nT$ 处的幅度 $y_0(nT)$ 等于响应序列中相应数码所代表的数值大小。

后置模拟滤波器,又称为平滑滤波器,其作用是滤除模拟信号 $y_0(t)$ 中不必要的高频分量,将模拟信号 $y_0(t)$ 平滑成为所需要的模拟信号 $y_a(t)$ 。

如果只需要数字输出,可以直接以数字形式显示或打印,则图 1.1.1 中就不需要 D/A 变换器;如果处理的对象是数字信号,则图 1.1.1 中就不需要 A/D 变换器;如果处理的对象是数字信号,而且只需要数字输出,则图 1.1.1 中既不需要 A/D 变换器也不需要 D/A 变换器,仅需要一个数字信号处理器这一核心器件便可。

1.2 数字信号处理系统的特点

1. 精度高

模拟系统的精度由元件的精度确定,模拟元件的精度很难达到高于 10^{-3} 的量级,而只要 14 位字长的数字系统就可达到 10^{-4} 的精度。因此,在高精度下,只能采用数字系统。

2. 可靠性强

模拟系统的各元件有一定的温度系数,由于各元件上的电平连续变化,因此容易受环境温度、噪声、电