

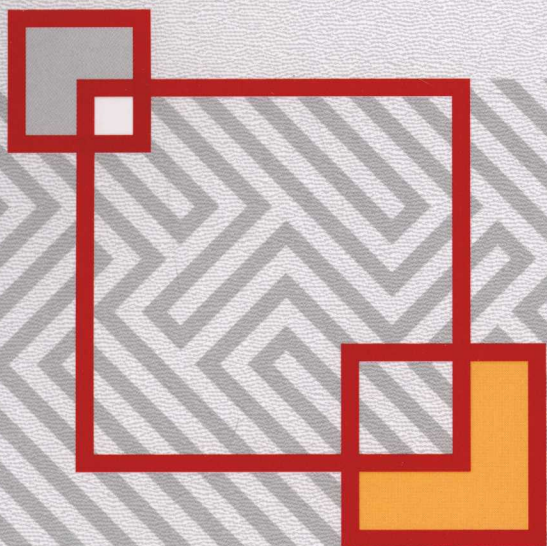
中国通信学会普通高等教育『十二五』规划教材立项项目

21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

数字信号 处理

王艳芬 张晓光 刘卫东 王刚 编著

Digital Signal Processing



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



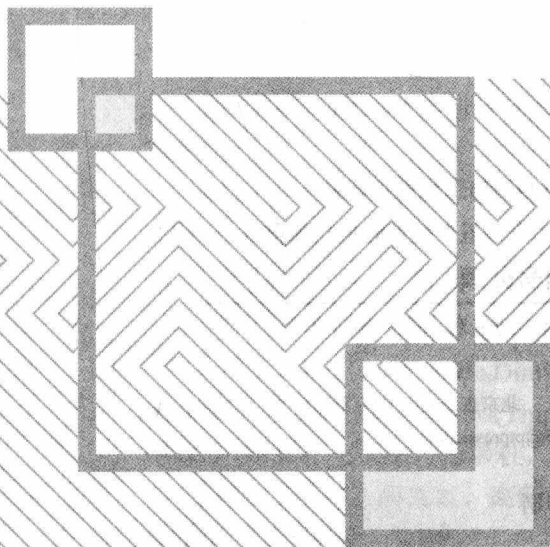
精品系列

中国通信学会普通高等教育『十二五』规划教材立项项目
21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
21st Century University Planned Textbooks of Information and Communication Engineering

数字信号 处理

王艳芬 张晓光 刘卫东 王刚 编著

Digital Signal Processing



人民邮电出版社

北京



精品系列

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理 / 王艳芬等编著. — 北京: 人民邮电出版社, 2010. 8
21世纪高等院校信息与通信工程规划教材
ISBN 978-7-115-22680-8

I. ①数… II. ①王… III. ①数字信号—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(2010)第086920号

内 容 提 要

本书系统阐述了数字信号处理的基本原理和算法分析, 共包括8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、快速傅里叶变换、无限脉冲响应数字滤波器设计、有限脉冲响应数字滤波器设计、数字信号处理 MATLAB 实现及综合应用以及数字信号处理实验等。每章后面配有思考练习题与习题。

本书概念叙述通俗易懂、理论分析简明清楚, 特别是突出了基于 MATLAB 的应用实践环节, 不仅介绍了主要章节的 MATLAB 实现以及在实际中的几个典型综合应用, 而且还有专门的数字信号处理上机实验一章, 理论和实践结合紧密。本书主要作为信息工程、通信工程、电子科学与技术、电气自动化以及其他电类专业本科生(独立学院、高职类)教材, 也可供从事信息处理、通信、电子技术等方面的工程技术人员及有关科研、教学人员参考使用。

21 世纪高等院校信息与通信工程规划教材

中国通信学会普通高等教育“十二五”规划教材立项项目

数字信号处理

-
- ◆ 编 著 王艳芬 张晓光 刘卫东 王 刚
责任编辑 蒋 亮
 - ◆ 人民邮电出版社出版发行 北京市崇文区夕照寺街14号
邮编 100061 电子函件 315@ptpress.com.cn
网址 <http://www.ptpress.com.cn>
北京鑫正大印刷有限公司印刷
 - ◆ 开本: 787×1092 1/16
印张: 16.75 2010年8月第1版
字数: 407千字 2010年8月北京第1次印刷

ISBN 978-7-115-22680-8

定价: 29.80 元

读者服务热线: (010)67170985 印装质量热线: (010)67129223

反盗版热线: (010)67171154

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8章,包括4部分内容。第1部分包括第1、2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。第2部分包括第3、4章离散傅里叶变换(DFT)及其快速傅里叶变换(FFT),它是数字信号处理中的核心内容,是进行数字频谱分析的重要手段。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-2 FFT和IFFT的高效算法。数字滤波器是数字信号处理研究的重要内容,本书第3部分包括第5、6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不变法,还介绍了IIR数字滤波器的网络结构;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、频率采样设计法等,还介绍了FIR数字滤波器的基本网络结构和特点。第4部分包括第7、8章,这两章是课程学习的重要实践环节。第7章主要介绍了基于MATLAB的数字信号处理实现以及在实际中的几个典型综合应用;第8章是数字信号处理上机实验,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,不仅能帮助大家掌握课程的重要概念和基本内容,而且对以后深入学习和应用信号处理知识,解决一些具体问题,都会有很大的帮助。

本书主要为信息工程、通信工程、电子科学与技术、电气自动化以及其他电类专业本科生(独立学院、高职类)所编,加强了基本概念的阐述,精简了复杂理论的推导,突出了应用实践。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,并提供了 MATLAB 演示程序及与实际结合密切的综合性应用实例,使读者能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“数字信号处理 MATLAB 实现及综合应用”、“数字信号处理实验”两章,突出了理论和实践相结合的环节,章后配有上机习题,可以作为课程实验练习。

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

由于作者水平有限,书中难免存在不少问题和错误,诚挚希望广大读者提出宝贵意见并批评指正。

编 者
于中国矿业大学
2010 年 6 月

目 录

绪论	1	思考练习题	25
0.1 信号、系统与信号处理	1	习题	25
0.2 数字信号处理系统的基本组成	2	第2章 离散时间信号与系统的频域分析	28
0.3 数字信号处理的特点及基本学科分支	3	2.1 序列的傅里叶变换的定义及性质	28
0.4 数字信号处理系统的实现方法	4	2.1.1 序列的傅里叶变换的定义	28
0.5 数字信号处理的应用领域	4	2.1.2 常用序列的傅里叶变换	29
第1章 离散时间信号与系统的时域分析	6	2.1.3 序列的傅里叶变换的性质	30
1.1 模拟信号的数字处理方法	6	2.2 序列的Z变换	34
1.1.1 采样	6	2.2.1 Z变换的定义及其收敛域	34
1.1.2 理想采样及其频谱	7	2.2.2 序列特性对Z变换收敛域的影响	35
1.1.3 时域采样定理	8	2.2.3 Z反变换	40
1.1.4 采样的恢复	9	2.2.4 Z变换的基本性质	44
1.1.5 采样内插公式	9	2.3 系统函数与频率响应	49
1.2 离散时间信号	12	2.3.1 系统函数的定义	49
1.2.1 序列	12	2.3.2 系统函数和差分方程	49
1.2.2 常用基本序列	12	2.3.3 系统函数的收敛域与系统的因果稳定性	50
1.2.3 序列的基本运算	15	2.3.4 频率响应	51
1.2.4 任意序列的单位脉冲序列表示	16	2.3.5 IIR和FIR系统	57
1.3 离散时间系统	17	思考练习题	58
1.3.1 线性系统	17	习题	58
1.3.2 时不变系统	17	第3章 离散傅里叶变换	62
1.3.3 线性时不变系统输入输出的关系	18	3.1 傅里叶变换的几种形式	63
1.3.4 线性卷积的计算	19	3.1.1 连续时间、周期信号的傅里叶级数	63
1.3.5 线性时不变系统的性质	21	3.1.2 连续时间、非周期信号的傅里叶变换	63
1.3.6 系统的因果性和稳定性	22	3.1.3 离散时间、非周期信号的傅里叶变换	64
1.4 离散时间系统的时域描述——差分方程	23	3.1.4 离散时间、周期信号的离散傅里叶级数	64
1.4.1 常系数线性差分方程的一般表达式	23	3.2 离散傅里叶级数	65
1.4.2 差分方程的求解	24		

3.2.1 离散傅里叶级数的推导	65	5.1.2 技术指标描述	112
3.2.2 离散傅里叶级数的性质	67	5.1.3 设计方法	113
3.3 离散傅里叶变换	69	5.2 模拟滤波器的设计	114
3.3.1 从离散傅里叶级数到离散傅里叶变换	69	5.2.1 模拟滤波器的指标要求及逼近方法	116
3.3.2 DFT 和 Z 变换、DTFT 之间的关系	71	5.2.2 巴特沃思低通滤波器	118
3.3.3 离散傅里叶变换的性质	73	5.2.3 模拟滤波器的频率变换	122
3.4 频域采样理论	78	5.3 根据模拟滤波器来设计 IIR 滤波器	127
3.4.1 频域采样	79	5.3.1 脉冲响应不变法	127
3.4.2 内插恢复	80	5.3.2 双线性变换法	133
3.5 DFT 的应用	82	5.3.3 数字滤波器的频率变换	136
3.5.1 用 DFT 计算线性卷积	82	5.4 IIR 滤波器的基本网络结构	139
3.5.2 用 DFT 进行频谱分析	85	5.4.1 网络结构的表示方法	139
思考练习题	92	5.4.2 直接型	140
习题	92	5.4.3 级联型	142
第 4 章 快速傅里叶变换	95	5.4.4 并联型	144
4.1 直接计算 DFT 的问题及改进的途径	95	思考练习题	145
4.1.1 直接计算 DFT 的运算量问题	95	习题	146
4.1.2 改善途径	96	第 6 章 有限脉冲响应数字滤波器的设计	149
4.2 按时间抽取的基-2FFT 算法	96	6.1 线性相位 FIR 滤波器特性	149
4.2.1 算法原理	96	6.1.1 线性相位的概念	149
4.2.2 DIT-FFT 算法与直接计算 DFT 运算量的比较	100	6.1.2 线性相位条件	151
4.2.3 算法特点	100	6.1.3 幅度函数特性	153
4.3 按频率抽取的基-2FFT 算法	103	6.1.4 线性相位 FIR 滤波器的零点特性	159
4.3.1 算法原理	103	6.2 FIR 滤波器的窗函数法设计	160
4.3.2 算法特点	105	6.2.1 设计原理	160
4.4 IDFT 的高效算法	105	6.2.2 加窗对滤波器频率特性的影响	162
4.4.1 利用 FFT 流程图计算 IFFT	105	6.2.3 常用窗函数	166
4.4.2 直接调用 FFT 子程序的方法	106	6.2.4 窗函数法设计线性相位 FIR 滤波器的一般步骤	172
4.5 实序列的 FFT 算法	107	6.3 FIR 滤波器的频率采样法设计	173
思考练习题	108	6.3.1 设计方法	174
习题	109	6.3.2 设计线性相位 FIR 滤波器的约束条件	174
第 5 章 无限脉冲响应数字滤波器的设计	110	6.3.3 逼近误差	175
5.1 数字滤波器的基本概念	110		
5.1.1 数字滤波器的分类	110		

6.3.4 改善滤波器性能的措施.....	176	7.2.4 DTMF 信号检测的 MATLAB 仿真	217
6.3.5 频率采样法设计线性相位 FIR 滤波器的一般步骤	177	7.3 在 wav 信号分析方面的应用	219
6.4 FIR 滤波器的基本网络结构	179	7.3.1 wav 文件的一次性傅里叶 变换	219
6.4.1 直接型 (卷积型)	180	7.3.2 wav 文件的分段傅里叶分析	221
6.4.2 级联型	181	7.4 在自适应滤波器方面的应用	223
6.4.3 频率采样结构	181	7.4.1 自适应滤波原理	223
6.4.4 线性相位结构	185	7.4.2 系统辨识与 MATLAB 仿真	225
6.5 FIR 滤波器和 IIR 滤波器的比较	187	7.4.3 噪声抵消与 MATLAB 仿真	228
思考练习题	188	设计习题	231
习题	188	第 8 章 数字信号处理实验	233
第 7 章 数字信号处理 MATLAB 实现 及综合应用	192	8.1 信号、系统及系统响应实验	233
7.1 数字信号处理 MATLAB 实现	192	8.2 FFT 频谱分析及应用实验	235
7.1.1 MATLAB 简介	192	8.3 数字滤波器设计实验	238
7.1.2 离散时间信号与系统分析应 用举例	195	8.3.1 IIR 数字滤波器的设计	238
7.1.3 离散傅里叶变换应用举例	198	8.3.2 FIR 数字滤波器的设计	241
7.1.4 IIR 滤波器设计常用函数及举 例	203	8.4 数字滤波器的 Simulink 仿真实 验	244
7.1.5 FIR 滤波器设计常用函数及 举例	207	8.5 交互式工具应用实验	246
7.2 在双音拨号系统中的应用	214	8.5.1 滤波器分析设计工具 FDATool 应用实验	246
7.2.1 电话的双音拨号系统	214	8.5.2 信号处理工具 SPTool 应用 实验	249
7.2.2 Goertzel 算法	215	上机习题	252
7.2.3 检测 DTMF 信号的 DFT 参数选择	216	附录 本书用到的 MATLAB 特殊函数	257
		参考文献	259

自 20 世纪 60 年代以来,随着计算机和信息学科快速发展,数字信号处理技术应运而生并迅速发展,现已成为一门独立的学科并应用于众多领域。简单地说,数字信号处理是利用计算机或专用处理设备,以数值计算的方法对信号进行滤波、变换、压缩、识别、增强等加工处理以达到提取有用信息便于应用的目的。信号处理几乎涉及所有的工程技术领域。

0.1 信号、系统与信号处理

1. 信号

信号是信息的一种物理体现,是信息的载体。信号可以是多种多样的,如根据载体的不同,信号可以是电的、磁的、光的、声的、机械的、热的等等。但在各种信号中,电信号是最便于传输、处理和重现的,因此也是应用最广泛的。许多非电信号如温度、压力,都可通过适当的传感器变换成电信号,因此对电信号的研究具有普遍的意义。

信号以某种函数的形式传递信息。这个函数可以是时间域、频率域或其他域的,但最基础的域是时域。时域信号 $s(t)$, 其自变量 t 可以有连续和离散两种形式,其函数值(幅度)也有连续和离散(量化)两种形式。两者共有四种可能的组合,但常用的是其中的三种:模拟信号、离散时间信号和数字信号。

(1) 模拟信号:也称连续时间信号。信号 $x(t)$ 的自变量 t 和函数值 $x(t)$ 都是连续变化的。

(2) 离散时间信号:也称序列。信号 $x(nT)$ 的自变量 nT 是时域的离散采样点,而函数值是连续变化的。扩大到一般情况,可用 $x(n)$ 代表时间离散、幅值连续的任何序列。此处的 n 仅表示顺序号,可以是时间轴顺序,也可以是其他任何某个域、某种轴上的序号。

(3) 数字信号:信号 $x_q(n)$ 在时间和幅值上都是离散的,或者说数字信号就是幅度量化了的离散时间信号。

2. 系统

系统定义为处理(或变换)信号的物理设备,或者说,凡是能将信号加以变换以达到人们要求的各种设备都称为系统。按照所处理的信号分类,可将系统分为三类。

(1) 模拟系统:处理模拟信号的系统,即系统的输入、输出均为模拟信号。通常由电容、

电感、电阻、半导体器件以及模拟集成电路组成的网络和设备是模拟系统。

(2) 离散时间系统：处理离散时间信号的系统，即系统的输入、输出均为离散时间信号。比如用电荷耦合器件 (CCD) 以及开关电容网络组成的系统。

(3) 数字系统：处理数字信号的系统，即系统的输入、输出均为数字信号。由数字运算单元、存储单元、逻辑控制单元以及 CPU 等组成的系统都是数字系统。

3. 信号处理

信号处理，即是用系统对信号进行某种加工，包括滤波、分析、变换、谱分析、参数估计、综合、压缩、估计、识别等等。

数字信号处理，即是利用数字计算机或专用数字硬件，对数字信号所进行的一切变换或按预定规则所进行的一切加工处理运算，例如滤波、检测、参数提取、频谱分析等。或者说，数字信号处理是用数值计算的方法，完成对信号的处理。

图 0-1 所示是一个简单的一阶高通模拟滤波器，它是由电阻 R 和电容 C 组成的。而图 0-2 是一个简单的数字滤波器，由一个加法器、一个延时器和一个乘法器组成。因此数字信号处理的实质是“运算”，运算的基本单元是延时器、加法器和乘法器。

从技术观点看，信号处理有两种基本方法：一是滤波，滤除信号中不需要的分量，例如在单边带通信系统中，应用滤波的方法抑制带外的频率分量；另一个是分析或变换，对信号进行各种方法的分析，估计某些特征参数，或者用变换方法对信号进行频谱分析，从而确定信号中有效信息的分布。

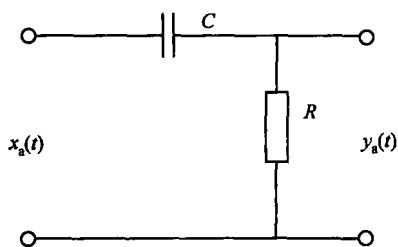


图 0-1 简单的一阶高通模拟滤波器

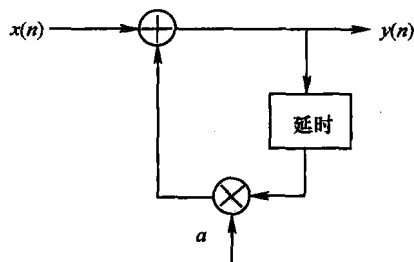


图 0-2 简单的数字滤波器方框图

数字信号处理是以 PC 或专用 DSP 装置为硬件平台，以数值分析、信号处理算法为基本工具，实现信号有用信息的提取，以达到认识信号、利用信号并将其用于实际的目的。

0.2 数字信号处理系统的基本组成

以下讨论模拟信号的数字信号处理系统。该系统首先将模拟信号变换为数字信号，然后用数字技术进行处理，最后还原成模拟信号，系统框图如图 0-3 所示。

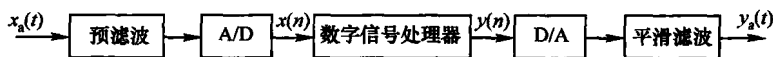


图 0-3 模拟信号的数字信号处理系统框图

图 0-3 中，预滤波器的作用是对模拟信号进行预处理，将输入信号 $x_s(t)$ 中高于某一频率

(称为折叠频率, 等于采样频率的一半) 的分量加以滤除, 改善信号的带限性能, 有利于后面的采样, 具有抗混叠作用。在 A/D 变换器中, 每隔 T 秒 (抽样周期) 取出一次 $x_a(t)$ 的幅度, 采样后的信号称为离散信号 $x_a(nT)$; 随后由 A/D 变换器中的保持电路进一步将采样信号变换为数字信号序列 $x(n)$ 。数字信号序列 $x(n)$ 通过图 0-3 所示系统的核心部分, 即数字信号处理器, 按照预定的要求, 将信号序列 $x(n)$ 进行加工处理, 得到输出信号 $y(n)$ 。再由 D/A 变换器将二进制码流变换为模拟信号, 经模拟滤波器进一步平滑 D/A 变换器的输出, 以滤除掉不需要的高频分量, 生成所需的模拟信号 $y_a(t)$ 。

需要注意的是, 图 0-3 仅表示模拟信号的数字信号处理系统框图, 实际中的系统并不一定包括图中的所有框。对于纯数字系统只需要核心部分——数字信号处理器就可以了。

0.3 数字信号处理的特点及基本学科分支

1. 数字信号处理的特点

数字信号处理是用数值计算的方法, 完成对信号的处理, 因此处理的实质是“运算”。运算的基本单元是延时器、乘法器和加法器。数字信号处理可以通过编软件, 在通用计算机上完成, 也可以根据算法选择一种运算结构, 采用数字信号处理器实现。

与模拟系统 (ASP) 相比, 数字系统具有如下特点。

(1) 精度高。模拟系统的精度是由元件决定的, 模拟元器件的精度很难达到 10^{-3} 以上; 而在数字系统中, 17 位字长就可达到 10^{-5} 精度。所以在高精度系统中, 有时只能采用数字系统。

(2) 可靠性强。模拟系统各参数都有一定的温度系数, 易受环境条件如温度、振动、电磁感应等影响, 产生杂散效应甚至振荡等。数字系统只有两个信号电平 0 和 1, 受噪声及环境条件等的影响小。且数字系统采用大规模集成电路, 其故障率远远小于采用众多分立元件构成的模拟系统。

(3) 灵活性大。数字系统的性能主要决定于乘法器的各系数, 且系数存放于系数存储器内, 只需改变存储的系数, 就可得到不同的系统, 比改变模拟系统方便得多。例如, 改变图 0-2 中的 a 参数, 可以构成数字低通、高通或带通滤波器。

(4) 易于大规模集成。数字部件具有高度规范性, 便于大规模集成、大规模生产, 对电路参数要求不严, 故产品成品率高。尤其是对于低频信号, 如地震波分析, 需要过滤几 Hz~几十 Hz 的信号, 用模拟系统处理时, 电感器和电容器的数值、体积、重量非常大, 且性能亦不能达到要求, 而数字信号处理系统在这个频率处却非常优越。

(5) 时分复用。时分复用就是利用数字信号处理器同时处理几个通道的信号。由于数字信号的相邻两抽样值之间有一定的空隙时间, 因而在同步器的控制下, 在此空隙时间中送入其他路的信号; 而各路信号则利用同一个数字信号处理器, 后者在同步器的控制下, 计算完一路信号后, 再计算另一路信号, 因而处理器运算速度越高, 能处理的信道数目也就越多。

(6) 可获得高性能指标。即可以实现模拟系统很难达到的指标或特性。例如对信号进行频谱分析, 模拟频谱仪在频率低端只能分析 10Hz 以上频率, 且难以做到高分辨率 (也即足

够窄的带宽);但在数字的谱分析中,已能做到 10^{-3}Hz 的谱分析。又如有限长脉冲响应数字滤波器(FIR)可实现准确的线性相位特性,这在模拟系统中是很难达到的。

2. 数字信号处理的基本学科分支

数字信号处理(DSP)一般有两层含义,一层是广义的理解,即数字信号处理技术(Digital Signal Processing);另一层是狭义的理解,即数字信号处理器(Digital Signal Processor)。

数字信号处理涉及的内容非常丰富和广泛,本书作为专业基础课教材,主要学习 DSP 的第一层含义(广义的理解),即数字信号处理的基本理论和基本方法,而且主要讨论 DSP 的经典内容即数字信号滤波和数字信号频谱分析。其中离散时间信号和系统的基本概念以及时域、频域分析方法是数字信号处理理论的基础内容。此外,数字信号处理是一门理论和实践、原理和应用结合非常紧密的课程,因此,本书专门在第 7、8 两章引入基于 MATLAB 的实践内容和综合应用。

0.4 数字信号处理系统的实现方法

数字信号处理的主要对象是数字信号,且是采用运算的方法达到处理的目的,所以基本的处理方法分为软件实现和硬件实现:软件实现是通过自己编写程序或采用现成的程序在通用的计算机上实现;硬件实现是按照具体的要求和算法设计硬件结构图,用加法器、乘法器等硬件电路来实现。数字信号处理方法具体有以下几种。

(1) 利用通用计算机用软件:软件采用高级语言编写,也可利用商品化的各种 DSP 软件如 MATLAB、SYSTEMVIEW 等。该方法实现简单、灵活,但实时性较差,很少用于实时系统,主要用于教学和科研的前期研制阶段。

(2) 利用单片机:单片机发展已经很久,价格便宜,且功能很强。根据不同环境配不同单片机,能实现实时控制。但数据运算量不能太大,即单片机不能用于复杂的信号处理。

(3) 利用通用 DSP 芯片: DSP 芯片较之单片机有着更为突出的优点,如内部带有乘法器、累加器,采用流水线工作方式及并行结构,多总线速度快,配有适于信号处理的指令(如 FFT 指令)等。

(4) 利用特殊用途的 DSP 芯片:即市场上推出的专门用于 FFT、FIR 滤波器、卷积、相关等的专用数字芯片,其软件算法已固化在芯片内部,使用非常方便。这种方式比通用 DSP 芯片速度更高,但功能比较单一,灵活性较差。

目前世界上生产 DSP 芯片的主要厂家有:美国德州仪器 TI 公司(TMS320CX 系列)、AT&T 公司(DSP16、DSP32 系列)、Motorola 公司(DSP56x、DSP96x 系列)、AD 公司(ADSP21X、ADSP210X 系列)等。

0.5 数字信号处理的应用领域

自 20 世纪 60 年代以来,数字信号处理的应用已成为一种明显的趋势,这与数字信号处理的突出优点是分不开的。数字信号处理广泛应用于通信、雷达、语音和图像处理、生物医学、仪器仪表、机械振动、地质勘探、故障检测等领域,有效地推动了众多工程技术领域的

技术改造和学科发展。近年来,随着多媒体的发展,DSP 芯片已在家电、电话、磁盘机等设备中广泛应用。可以说,只要使用计算机和数据打交道,几乎都要用到数字信号处理技术。概括起来,数字信号处理主要应用在以下几个方面。

(1) 滤波和变换——包括数字滤波和卷积、相关、快速傅里叶变换、希尔伯特变换、自适应滤波等。

(2) 通信——包括自适应差分编码调制、增量调制、自适应均衡、移动通信、卫星通信、扩频技术、回波抵消、软件无线电等。

(3) 语音、语言——包括语音邮件、语音声码器、语音压缩、数字录音系统、语音识别、语音合成、语音增强、文本语音变换、神经网络等。

(4) 图像、图形——包括图像压缩、图像增强、图像重建、图像变换、图像分割、模式识别、电子地图、动画等。

(5) 消费电子——包括数字音频、数字电视、CD/VCD/DVD 播放器、数字留言/应答机、电子玩具和游戏等。

(6) 仪器仪表——包括频谱分析仪、函数发生器、地震信号处理器、瞬态分析仪。

(7) 工业控制与自动化——包括机器人控制、激光打印机控制、伺服控制、计算机辅助制造、自适应驾驶控制等。

(8) 医疗——包括超声仪器、诊断工具、CT 扫描、核磁共振、助听器等。

(9) 军事——包括雷达处理、声纳处理、自适应波束形成、阵列天线信号处理、导航、射频调制解调、全球定位系统(GPS)、侦察卫星、航空航天测试等。

信号是信息的一种物理体现，它以某种函数的形式传递信息。一般将信号分为三类：连续时间信号、离散时间信号和数字信号。其中离散时间信号是指信号在时间上是离散的，即只在某些不连续的规定瞬时给出信号的函数值，而在其他时间没有定义。离散时间信号可以通过对连续时间信号进行采样得到，也就是在采样瞬间保留了原连续信号的幅度值，该信号也被称为采样数据信号，其特点是时间上离散、幅度上具有无限精度的连续量。为了对信号进行数字化处理，必须对其幅度按要求的精度进行有限位的量化。这种时间上离散、幅度上被量化的信号被称为数字信号。数字信号能用数字系统进行各种处理，以达到分析、识别或使用的目的。

“数字信号处理”，顾名思义，就是对数字信号进行分析、处理和加工，它主要包括数字滤波和频谱分析两大方面。为了对数字信号处理有一个大致的概念性了解，我们先从模拟信号的数字化处理谈起。

本章作为数字信号处理的基础，将主要介绍模拟信号的数字处理方法，离散时间信号和系统的基本概念、基本分析方法。具体为：离散时间信号的表示方法，典型信号、线性时不变系统的因果性和稳定性，系统的输入输出描述法，线性常系数差分方程的解法。

1.1 模拟信号的数字处理方法

在绪论中我们已介绍了数字信号处理技术相对于模拟信号处理技术的许多优点，那么什么是模拟信号的数字化处理？

模拟信号的数字化处理就是先将模拟信号转变为数字信号，然后用数字技术的处理手段对该信号进行加工（例如数字滤波），再将处理和加工后的信号还原为模拟信号。上述整个过程称为模拟信号的数字化处理。

本节讨论如何把模拟信号转变成数字信号。

1.1.1 采样

“采样”是从连续时间信号到离散时间信号过渡的桥梁，它可以看作是数字化处理的第一个环节。所谓“采样”，就是利用采样脉冲序列 $p(t)$ 从连续时间信号 $x_a(t)$ 中抽取一系列的离散样值，由此得到的离散时间信号通常称为采样信号，以 $\hat{x}_a(t)$ 表示。以后我们都以下标 a 表示连续时间信号，而以顶部符号（ $\wedge$ ）表示它的采样信号。图 1-1 为实现采样的原理框图。

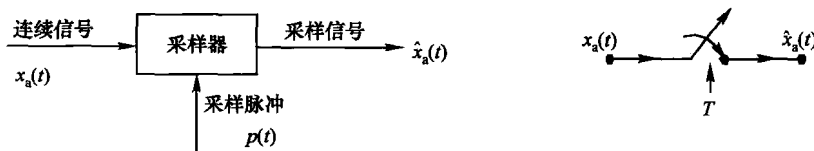


图 1-1 采样的原理框图

采样器可以看成是一个电子开关，设开关每隔 T 秒短暂地闭合一次，将连续信号接通，实现一次采样。如果开关每次闭合的时间为 τ 秒，那么采样器的输出将是一串周期为 T 、宽度为 τ 的脉冲，而脉冲的幅度却是重复着在这段 τ 时间内信号的幅度。这个过程可以看作是一个脉冲调幅过程。被调制的脉冲载波是一串周期为 T 、宽度为 τ 的矩形脉冲信号，即采样脉冲序列 $p(t)$ ，而调制信号就是输入的连续信号。该采样过程可用图 1-2 表示，因而有

$$\hat{x}_a(t) = x_a(t) \cdot p(t) \quad (1-1)$$

当采样脉冲序列为脉宽为 τ 的矩形脉冲时，称为矩形脉冲采样，也是实际采样，如图 1-2 (a) 所示；当脉冲宽度 $\tau \rightarrow 0$ 时，得到的是理想采样，如图 1-2 (b) 所示。本节讨论理想采样。

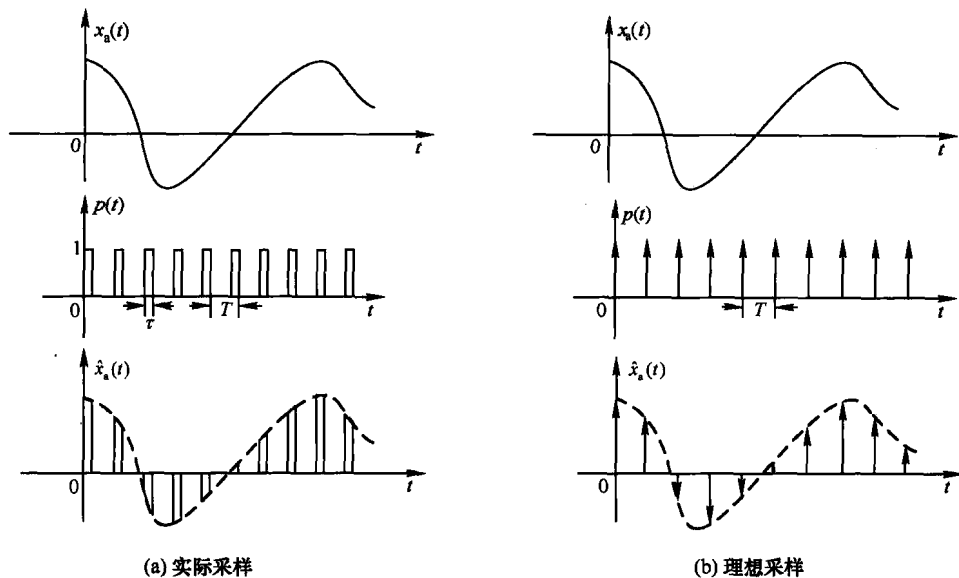


图 1-2 对模拟信号进行采样

1.1.2 理想采样及其频谱

理想采样就是假设采样开关闭合时间无限短，即 $\tau \rightarrow 0$ 的极限情况。此时，采样脉冲序列 $p(t)$ 为冲激函数序列 $\delta_T(t)$ ，这些冲激函数准确地出现在采样瞬间，而面积（即积分幅度）为 1，采样后理想采样信号的面积则准确地等于输入信号在采样瞬间的幅度。

冲激函数序列为

$$\delta_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} \delta(t - nT) \quad (1-2)$$

理想采样输出

$$\hat{x}_a(t) = x_a(t) \cdot \delta_T(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_a(t) \delta(t - nT) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_a(nT) \delta(t - nT) \quad (1-3)$$

下面讨论理想采样后, 信号频谱发生的变化。

考虑到周期信号可以用傅里叶级数展开, 因此, 冲激函数序列 $\delta_T(t)$ 可用傅里叶级数表示为

$$\delta_T(t) = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{jn\Omega_s t} \quad n = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$$

则理想采样输出

$$\begin{aligned} \hat{x}_a(t) &= x_a(t) \cdot \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{jn\Omega_s t} \\ \hat{X}_a(j\Omega) &= \int_{-\infty}^{\infty} \hat{x}_a(t) e^{-j\Omega t} dt = \int_{-\infty}^{\infty} x_a(t) \cdot \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{jn\Omega_s t} \cdot e^{-j\Omega t} dt \\ &= \frac{1}{T} \int_{-\infty}^{\infty} x_a(t) \cdot \sum_{n=-\infty}^{\infty} e^{-j(\Omega - n\Omega_s)t} dt = \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} x_a(t) \cdot e^{-j(\Omega - n\Omega_s)t} dt \\ &= \frac{1}{T} \sum_{n=-\infty}^{\infty} X_a(j\Omega - jn\Omega_s) \end{aligned} \quad (1-4)$$

式 (1-4) 表明, 一个连续时间信号经过理想采样后, 其频谱将沿着频率轴以采样频率 Ω_s 为间隔而重复, 即频谱产生了周期延拓, 如图 1-3 所示。也就是说, 理想采样信号的频谱, 是 $X_a(j\Omega)$ 的周期延拓函数, 其周期为 Ω_s , 而频谱的幅度则受 $\frac{1}{T}$ 加权。由于 T 是常数, 所以除了一个常数因子外, 每一个延拓的谱分量都和原频谱分量相同。

1.1.3 时域采样定理

采样信号的频谱是频率的周期函数。如果信号 $x_a(t)$ 是带限信号, 并且其最高频率不超过 $\Omega_s/2$, 即

$$X_a(j\Omega) = \begin{cases} X_a(j\Omega) & |\Omega| < \Omega_s/2 \\ 0 & |\Omega| \geq \Omega_s/2 \end{cases} \quad (1-5)$$

那么采样频谱中, 基带频谱以及各次谐波调制频谱彼此是不重叠的。如果用一个带宽为 $\Omega_s/2$ 的理想低通滤波器, 如图 1-4 所示, 就可以将它的各次调制频谱滤掉, 从而只保留不失真的基带频谱。也就是说, 可以不失真地还原出原来的连续信号来。

但是, 如果信号最高频谱超过 $\Omega_s/2$, 那么在采样频谱中, 各次调制频谱就会相互交叠起来, 这就是频谱“混叠”现象。

因此, 采样频率的一半, 即 $\Omega_s/2$ 或 $f_s/2$, 也称作折叠频率, 因为它好像一面镜子, 信号频谱超过它时, 就会被折叠回来, 造成频谱的混叠。

由此得出结论: 为使采样后能不失真地还原出原信号, 采样频率必须大于两倍信号最高频率, 即 $f_s \geq 2f_{\max}$, 这就是奈奎斯特采样定理。

一般实际工作中, 为了避免频谱混叠现象发生, 采样频率总是选得比两倍信号最高频谱更大些, 例如选到 3~4 倍。同时为了避免高于折叠频率的杂散频谱进入采样器造成频谱混叠, 在采样器前常常加一个保护性的前置低通滤波器, 阻止一切高于 $\Omega_s/2$ 的频率分量进入, 所以

这个模拟低通滤波器也称为“抗混叠滤波器”。

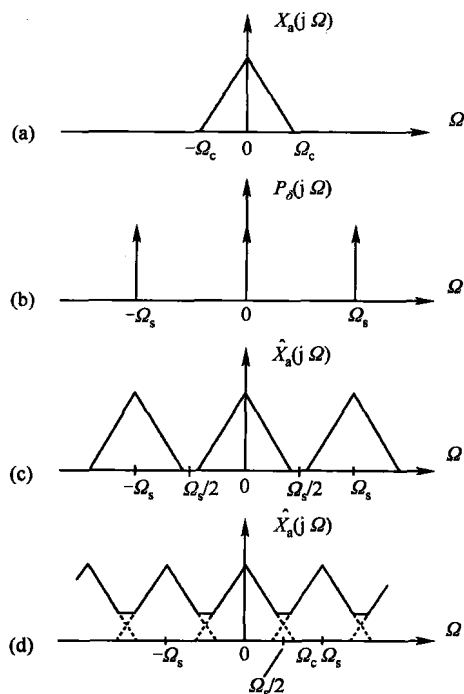


图 1-3 采样信号的频谱图

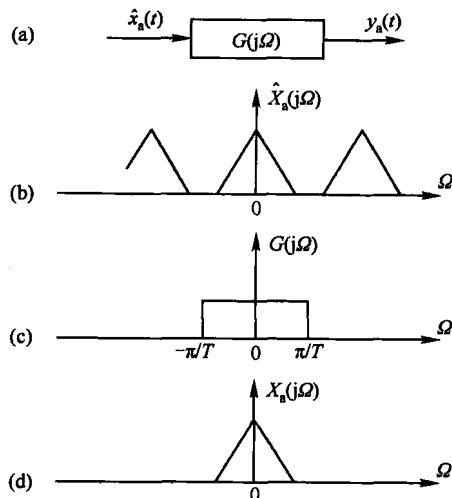


图 1-4 采样的恢复

1.1.4 采样的恢复

如果采样满足奈奎斯特采样定理，即信号最高频谱不超过折叠频率，我们可以将采样信号通过一个理想的低通滤波器 $G(j\Omega)$ ，这个理想低通滤波器应该只让基带频谱通过，因而其带宽应该等于折叠频率，即

$$G(j\Omega) = \begin{cases} T & |\Omega| < \Omega_s/2 \\ 0 & |\Omega| \geq \Omega_s/2 \end{cases} \quad (1-6)$$

采样信号通过这个低通滤波器，就可得到原信号频谱，即

$$Y(j\Omega) = \hat{X}_s(j\Omega) \cdot G(j\Omega) = \frac{1}{T} X_s(j\Omega) \cdot G(j\Omega) = X_s(j\Omega) \quad (1-7)$$

因此在输出端可以得到恢复的原模拟信号

$$y(t) = x_a(t)$$

当然，一个理想的低通滤波器是不可实现的，但是总可以在一定精度范围内，用一个可实现的网络去逼近它。

1.1.5 采样内插公式

理想低通 $G(j\Omega)$ 的冲激响应为

$$g(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} G(j\Omega) e^{j\Omega t} d\Omega = \frac{T}{2\pi} \int_{-\Omega_s/2}^{\Omega_s/2} e^{j\Omega t} d\Omega$$