

数字信号处理的原理与应用

〔美〕 L.R.拉宾纳, B.戈尔德 著

史 令 启 译

国防工业出版社

内 容 简 介

全书共分十三章，第一章叙述数字式信号处理概貌。第二章至第七章分别介绍数字信号处理的各种基本理论，包括线性离散系统理论，无限脉冲影响和有限脉冲响应数字滤波器的理论与设计，数字滤波器中字长的影响，谱分析与快速傅里叶变换，数论变换以及二维信号处理概论等。第八章至第十三章分别介绍数字硬件的一般知识，用于各种信号处理技术的通用和专用硬件以及数字式信号处理在语音和雷达方面的应用。

本书内容广泛，对于数字滤波器的设计问题有深入的讨论，并列举了许多实际数据。第三章附有用于设计最优FIR滤波器的FORTRAN程序。

本书可供高等院校数字信号处理专业或有关专业的研究生使用，也可供从事通信、电视、雷达、水声及有关工程技术人员参考使用。

THEORY AND APPLICATION OF DIGITAL SIGNAL PROCESSING

L. R. Rabiner, B. Gold

Prentice-Hall, Inc. 1975

数字信号处理的原理与应用

〔美〕 L. R. 拉宾纳, B. 戈尔德 著

史 令 启 译

国防工业出版社 出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

国防工业出版社印刷厂印装

787×1092¹/₁₆ 印张 35 815 千字

1982年2月第一版 1982年2月第一次印刷 印数: 0,001—5,800册

统一书号: 15034·2277 定价: 3.55元

译 者 的 话

信号处理是许多科学和工程技术领域中的一个重要方面,无论是通信、雷达、电视、水声、声学、语音、地震学、气象学、医学工程、核子工程以及航天工程等领域都离不开信号处理。早期的信号处理一直沿用模拟元件,这是因为当时在速度、成本、体积和可靠性等方面都是模拟元件占优势。但是,近十多年来,数字式信号处理有了突飞猛进的发展,随着大规模集成技术的进展,使数字部件的成本不断下降,体积大大缩小,运算速度和可靠性显著提高,于是应用数字信号处理的部门便越来越多。数字信号处理的发展趋势很可能推动某些应用领域发生巨大的变化。

本书内容丰富,从数字信号处理基本原理、数学工具到工程设计都有较详尽的介绍。尤其是对数字滤波器的设计问题讨论比较深入,叙述了多种设计方法并列举了许多实际数据。对快速傅里叶变换(FFT)作了相当全面深入的讨论;对二维系统的理论及用数论变换作卷积也作了初步介绍。书中还着重讨论了专用数字硬件在数字信号处理中的应用。此外,还举例说明了数字信号处理在语音及雷达中如何具体运用。

本书是A. V. 奥本海姆(A. V. Oppenheim)和R. W. 谢弗(R. W. Schafer)合著《数字信号处理》一书的姊妹篇,在阅读本书之前先学习该书的理论部分会有帮助。

本书由国防科学技术大学四系周祖同、王家培等集体翻译,其中参加翻译的有周祖同(第一章、第三章与第五章)、胡效敏(第二章)、皇甫堪(第四章)、郭桂蓉(第六章)、谷学敏(第七章)、秦恒玉(第八章)、朱益忠(第九章)、梁甸农(第十章)、刘之、刘达广(第十一章)、傅诚中(第十二章)及梁泰基(第十三章)等。全部译文由周祖同与王家培审校。史令启系该翻译集体的代称。另外,陆仲良、李钧及常梦雄等在本书译校过程中提出了不少宝贵意见,特此致谢。由于我们水平有限,译文可能有错误或不妥之处,欢迎批评指正。

目 录

第一章 绪言	1	3.3 FIR 滤波器设计方法的讨论	54
1.1 发展历史简介和一些说明	1	3.4 线性相位 FIR 滤波器的特性	55
1.2 数字信号处理概貌	2	3.5 线性相位 FIR 滤波器的频率响应	58
1.3 本书内容的组成	3	3.6 线性相位 FIR 滤波器的零点位置	61
第二章 离散时间线性系统理论	6	3.7 线性相位 FIR 滤波器的设计方法	63
2.1 引言	6	3.8 设计方法之一——窗孔加权法	64
2.2 序列	6	3.9 矩形窗孔	65
2.3 任意序列的表示法	8	3.10 “广义”汉明窗孔	66
2.4 线性、非时变系统	8	3.11 凯泽窗孔	68
2.5 因果性和稳定性	10	3.12 窗孔加权低通滤波器举例	68
2.6 差分方程	11	3.13 采用窗孔加权法的一些问题	74
2.7 频率响应	13	3.14 采用窗孔加权法的一些实际技术	74
2.8 一阶系统的频率响应	15	3.15 另一些用窗孔加权法设计的滤 波器的例子	76
2.9 二阶系统的频率响应	16	3.16 窗孔加权法小结	77
2.10 离散傅里叶级数	17	3.17 设计方法之二——频域抽样法	77
2.11 频率单位的说明	18	3.18 最优化的解	79
2.12 连续和离散系统间的关系	18	3.19 线性规划	80
2.13 z 变换	20	3.20 1-型和 2-型频域抽样	82
2.14 序列的傅里叶变换与 z 变换的关系	21	3.21 1-型设计——线性相位约束	83
2.15 z 逆变换	23	3.22 2-型设计——线性相位约束	84
2.16 z 变换的性质	24	3.23 频域抽样滤波器设计的某些一 般性结果	86
2.17 用单侧 z 变换解差分方程	27	3.24 频域抽样设计法小结	91
2.18 傅里叶变换的几何计算	28	3.25 设计方法之三——最优（极小化极 大误差）滤波器	91
2.19 数字滤波器的实现（结构）	29	3.26 加权的切比雪夫逼近法	92
2.20 全零点滤波器的结构	33	3.27 线性相位滤波器频率响应极值 数的约束	94
2.21 离散傅里叶变换	36	3.28 最大纹波数 FIR 滤波器的非线性 方程解	96
2.22 DFT 的性质	42	3.29 最大纹波数滤波器的多项式内 插解法	97
2.23 序列的卷积	43	3.30 用雷米兹交换算法设计最优 FIR 滤 波器	100
2.24 有限长度序列的线性卷积	44	3.31 用线性规划技术设计最优 FIR 滤 波器	103
2.25 分段卷积	46	3.32 最优情况 1 低通滤波器的特性	104
2.26 离散希尔伯特（Hilbert）变换	48		
2.27 实数信号的希尔伯特变换关系式	50		
参考文献	53		
第三章 有限长度脉冲响应数字滤波器 的理论和逼近	54		
3.1 引言	54		
3.2 滤波器设计的步骤	54		

3.33 情况 1 最优低通滤波器的另 一些性质	110	5.6 浮点算术运算法	225
3.34 最优低通滤波器各参数间的关系	115	5.7 分组浮点运算法	226
3.35 情况 2 最优低通滤波器的性质	117	5.8 数字滤波器中量化的类型	226
3.36 最优微分器的特性	121	5.9 截断	227
3.37 最优希尔伯特变换器的特性	126	5.10 舍入	228
3.38 多频带最优 FIR 滤波器	131	5.11 递归结构中的舍入噪声——定 点运算	229
3.39 时间和频率响应同时受约束的滤 波器的设计	134	5.12 动态范围限制——定点情况	233
3.40 各类 FIR 低通滤波器之间的 直接比较	135	5.13 直接式实现中的动态范围	237
参考文献	136	5.14 并联式实现中的动态范围	237
附录	139	5.15 级联式实现中的动态范围	238
第四章 无限长度脉冲响应数字滤波器 的理论及逼近	156	5.16 级联实现的排列顺序和配对	239
4.1 引言	156	5.17 舍入噪声同动态范围相互影响问题 的小结	240
4.2 IIR 滤波器的某些基本性质——幅值 平方响应、相位响应和群延迟	159	5.18 关于动态范围同舍入噪声相互影响 的补充解释	241
4.3 确定 IIR 滤波器系数的方法	160	5.19 非递归结构中的舍入噪声——定点 分析	242
4.4 由连续时间滤波器进行数字滤波 器的设计	160	5.20 直接式非递归实现中的舍入噪声	242
4.5 微分-差分映射法	161	5.21 级联式非递归实现中的舍入噪声	244
4.6 脉冲响应不变变换法	164	5.22 舍入噪声——递归结构的浮点实现	246
4.7 双线性变换法	167	5.23 系数量化	248
4.8 匹配 z 变换法	170	5.24 递归结构中的系数量化	248
4.9 低通模拟滤波器设计方法的复习	171	5.25 直接式实现中的系数量化	249
4.10 低通滤波器的设计图表	181	5.26 系数量化模型的实验验证	251
4.11 设计椭圆滤波器的脉冲响应不变变 换法和双线性变换法的比较	189	5.27 量化系数的最优化	252
4.12 频率变换法	192	5.28 成对极点实现中的系数量化	254
4.13 数字滤波器的直接设计	197	5.29 非递归结构中系数的量化	256
4.14 设计 IIR 滤波器的最优化方法	200	5.30 FIR 滤波器直接式实现中的系数量化	256
4.15 IIR 滤波器设计方法小结	211	5.31 FIR 滤波器级联式实现中的系数量化	258
4.16 FIR 滤波器和 IIR 滤波器的某些比较	212	5.32 极限环振荡	258
4.17 最优的 FIR 滤波器和延迟均衡的椭 圆滤波器的比较	215	参考文献	260
参考文献	218	第六章 频谱分析和快速傅里叶变换	262
第五章 数字滤波器中有限字长的影响	220	6.1 引言	262
5.1 引言	220	6.2 基数 2 FFT 简介	262
5.2 A/D 转换	220	6.3 基数 2 按时间抽取 FFT 的一些特性	266
5.3 D/A 转换	223	6.4 数据混序和二进位倒序	267
5.4 数字系统中算术运算的类型	224	6.5 FFT 的 FORTRAN 程序	269
5.5 定点算术运算法	224	6.6 按频率抽取算法	270
		6.7 通过作正向 DFT 计算逆 DFT	273
		6.8 统一的 FFT 方法	273
		6.9 基数 2 算法	279
		6.10 z 平面单个点上的频谱分析	280

6.11 用 FFT 作频谱分析	282	8.5 商品逻辑组件: 门电路, 多路转换器 和译码器; 触发器; 运算器; 存储器	371
6.12 频谱分析中几个需要考虑的问题	282	8.6 乘法器	379
6.13 “跳动式”FFT 和滤波器组的关系	284	8.7 除法器 and 浮点硬件	386
6.14 频谱分析中的窗孔	286	8.8 快速阵列乘法器设计举例	392
6.15 用 FFT 作 z 平面有限角内的频 谱测量	287	8.9 小结	396
6.16 布卢斯坦 (Bluestein) 算法	288	参考文献	396
6.17 Chirp z 变换算法	289	第九章 用于数字滤波和信号产生 的专用硬件	397
6.18 有噪声信号的功率谱	293	9.1 引言	397
6.19 用数论变换作卷积和相关	309	9.2 直接式 FIR 的硬件	397
参考文献	319	9.3 直接式 FIR 的并行	399
附录 FFT 的符号表示法	320	9.4 级联式 FIR 滤波器	400
第七章 二维信号处理理论简介	322	9.5 高度并行的直接式 FIR 滤波器	403
7.1 引言	322	9.6 直接式 IIR 滤波器	404
7.2 二维信号	322	9.7 级联式 IIR 滤波器	405
7.3 二维系统	323	9.8 多路复用	407
7.4 因果性、可分性、稳定性	324	9.9 数字按钮接收器 (TTR)	409
7.5 二维差分方程	325	9.10 数字时分多路 (TDM)-频分多路 (FDM) 转换器	410
7.6 频域方法	326	9.11 集成电路 (IC) 实现的数字滤波器 的划分	412
7.7 二维 z 变换	328	9.12 数字频率合成器的硬件实现	413
7.8 有限序列	328	9.13 产生伪随机数的方法	416
7.9 z 变换的卷积特性	328	9.14 产生高斯随机数的方法	418
7.10 二维 DFT	329	参考文献	419
7.11 滤波器设计的考虑	330	第十章 用于快速傅里叶变换的专 用硬件	421
7.12 IIR 滤波器	331	10.1 引言	421
7.13 稳定性的考虑	332	10.2 FFT 原理评述	421
7.14 FIR 滤波器	335	10.3 FFT 的标号——对于固定基数, 按二 进位倒序和按数位倒序	425
7.15 二维窗孔	335	10.4 基数 2、基数 4 和基数 8 计算 量的比较	430
7.16 低通滤波器窗孔设计的例子	336	10.5 FFT 算法的量化影响	430
7.17 频域抽样滤波器	339	10.6 基数 2 算法硬件的若干考虑	435
7.18 二维频域抽样低通滤波器	343	10.7 “最优”基数 2 硬件结构	437
7.19 最优 (极小化极大误差) 二维滤波 器的设计	346	10.8 用并行处理加快 FFT 速度的讨论	438
7.20 一维到二维的频域变换	348	10.9 使用快速寄存器的 FFT 计算	439
7.21 几个图像处理的例子	352	10.10 采用随机存取存储器 (RAM) 的基数 2 和基数 4 并行结构	440
参考文献	355	10.11 流水线 FFT 的一般性讨论	442
第八章 数字硬件导论	356		
8.1 引言	356		
8.2 关于数字信号处理硬件设计过程的 讨论	356		
8.3 布尔逻辑术语 (逻辑符号); 简单逻辑 网络举例	361		
8.4 主要的逻辑系列	365		

10.12 基数 2 流水线 FFT	443	12.2 产生语音的模型	482
10.13 基数 4 流水线 FFT	446	12.3 短时频谱分析	486
10.14 基数 2 和基数 4 流水线 FFT 的比较	450	12.4 基于短时频谱分析的语音分析-合成系统	488
10.15 并行程度更高的 FFT 硬件结构的讨论	450	12.5 关于分析的考虑	489
10.16 专用 FFT 处理器的总设计原则	453	12.6 全系统	493
10.17 具有随机存取存储器的重叠 FFT	454	12.7 谱带式声码器	494
10.18 利用单个 RAM 和一个运算单元的 FFT 实时卷积	455	12.8 声码器分析 (器) 部分——信号处理的考虑	495
10.19 10 兆赫流水线卷积器	456	12.9 声码器合成 (器) 部分——信号处理的考虑	496
参考文献	459	12.10 声码器的其它结构	498
第十一章 用于信号处理设备的通用硬件	460	12.11 音调检测和浊音-清音判别	498
11.1 引言	460	12.12 浊音-清音 (蜂音-嘘声) 检测	502
11.2 专用和通用计算机	460	12.13 语音的同态处理	503
11.3 如何描述计算机	461	12.14 同态声码器	505
11.4 游动求和程序	462	12.15 关于共振语频的合成	506
11.5 实时处理的输入输出问题	463	12.16 浊音摩擦音激励网络	509
11.6 提高计算机速度的方法	465	12.17 随机数产生器	510
11.7 超高速缓冲存储器	465	12.18 数字运算原理	510
11.8 运算并行化	466	12.19 语音的线性预测	511
11.9 存储、运算、控制和取指令的并行操作	467	12.20 计算机声音响应系统	514
11.10 林肯实验室快速数字处理机 (FDP)	468	12.21 小结	516
11.11 运算单元 (AE) 的结构	470	参考文献	517
11.12 时序	471	第十三章 数字信号处理在雷达中的应用	519
11.13 FDP 提高速度的特点小结	472	13.1 雷达原理及其应用简述	519
11.14 在 FDP 中实施 FFT	473	13.2 雷达系统及参量考虑	520
11.15 浮点程序	474	13.3 信号设计与模糊函数	523
11.16 并行化给 FDP 带来的特殊问题	476	13.4 雷达信号的数字匹配滤波器	530
11.17 LSP2 (林肯 2-型信号处理机)	477	13.5 用于空中交通管制的机场对空监视雷达——对抗杂乱回波问题的多普勒处理	536
11.18 用作数字信号处理的实验室计算机设备	479	13.6 远程实验雷达 (LRDR)	543
参考文献	481	13.7 高性能雷达用的数字匹配滤波器	547
第十二章 数字信号处理在语音研究中的应用	482	13.8 结束语	549
12.1 引言	482	参考文献	550

第一章 绪 言

1.1 发展历史简介和一些说明

第二次世界大战结束以后不久,电子学工程师们就曾推测过把数字硬件技术用于涉及信号处理的许多领域的可能性。例如,拉米尔(Laemmel)(1948)报导,在香农(Shannon)、博德(Bode)以及其他几位贝尔电话实验室的科学家的一次会晤中就讨论了用数字元件构成滤波器的可能性。不用说,那时的结论认为是不值得的。从成本、大小和可靠性各方面来考虑都以用模拟滤波和模拟频谱分析技术远为有利。在五十年代,斯托克海姆(Stockham)(1955)报导,林维尔(Linville)(当时任麻州理工学院教授)在研究生班讨论了数字滤波。在那时,以赫累维兹(Hurewize)(1945)的工作为部分基础的控制理论已成为一门学科;抽样的概念及其频谱效应已为人们所充分了解,而且从拉普拉斯时期就有了的数学工具 Z 变换理论已普及到电子学工程领域。但那时的工艺水平只能保证低频控制问题或低频地震信号处理问题的实际尝试。虽说当时地震科学家们已在明显地利用数字滤波概念来解决许多有意义的问题,但直到六十年代中期,才开始出现较为定型的数字信号处理理论。这时,估计到集成电路工艺的潜力,用数字部件极完善地综合出整个信号处理系统的设想就成为合理的了。

对数字信号处理领域最早的重大贡献是凯泽(Kaiser)(在贝尔实验室)在数字滤波器设计和综合方面的工作。凯泽的著作明白地说明了如何用双线性变换设计可用的滤波器。大约同时,库利-图基(Cooley-Tukey)(1965)关于计算离散傅里叶变换的快速方法的文章对此新出现的领域给予了巨大的推动,该快速算法随后通过美国《IEEE 音频和电声学汇刊》及其他期刊上的许多文章逐渐普及和扩展。这套技术从此称为快速傅里叶变换(FFT)。它的价值在于把计算离散傅里叶变换(DFT)的时间减少一到两个数量级。

在发表库利-图基的文章的同一时期,正式的和内容十分广泛的滤波器理论也在形成。FFT的巨大重要性在于它十分明显地证实了在频谱分析中采用数字方法较之采用模拟方法确实更为经济。于是促进了这一应用的范围迅速扩展,到现在它在信号处理问题中已得到极为广泛的应用,由地震学的低频频谱通过声纳和语音的声频频谱伸展到雷达系统的视频频谱。

或许,数字信号处理领域的发展中最重要的是FIR(有限脉冲响应)和IIR(无限脉冲响应)数字滤波器两者地位的相对变化。起初凯泽用窗孔函数分析了FIR滤波器,指出IIR滤波器比FIR滤波器效能好得多。但后来斯托克海姆关于用FFT方法做卷积的著作或者更具体地说关于FIR数字滤波的著作,指出高阶FIR滤波器能以极高的计算效率来实现;于是FIR滤波器和IIR滤波器相比较就不再认为IIR滤波器更好了。这些结果也激起对FIR滤波器的高效能设计方法的大量研究。

在进行这些研究活动的同一时期,教育界也开展了大量的工作,例如在许多研究生班

课表中加进有关数字信号处理的一些课程，并把这些课程的颇大一部分材料纳入大学电气工程系各课程中。

戈尔德 (Gold) 和雷德 (Rader)(1969) 所写的书是关于数字信号处理综合性理论的首次尝试。作为一本早期的书，不得不既用它做大学教材又用它做从事实际工作的工程师的指南。这本书在这两方面无疑都有缺点；用不着解释，一部编写完美的大学教材至少要以几年教学实践为基础加上一套精心收集的习题，而从事实际工作的工程师则希望有更多的设计数据和更成熟的综合方法。

上面简要地介绍了历史情况，现在来说明本书的目的。本书的写作主要是针对硬件工程师和计算机程序设计人员，即希望用硬件或软件设计成一个系统的工程师的需要而写的。为了给出此一领域的充分完整的概貌，我们认为一方面必须把理论同雷达、声纳、语音、音乐、地震和医学上的各类信号处理的应用联系起来，另一方面也要把它同数字元件工艺相联系，因为数字元件工艺是数字信号处理领域以及整个计算机设计领域向前发展的主要推动力。此外，现在已经有很多关于数字滤波器设计的新资料可供利用，而在数字滤波器的综合方面，我们感到还只是处在开始定形的早期阶段。同样，虽说 FFT 算法已被十分详尽地探讨过，但数字频谱分析仪的设计和综合却还没有充分地组织起来和系统地加以阐述；做到这一点也是写作本书的目标之一。观察一下本书内容的目录，读者可以更详细地看到我们是如何打算来实现我们的目的的。

最后一点总的看法，即从某种观点来看，数字信号处理是多种计算机算法的汇集，因此可以认为它只不过是计算数学的另一分支。但我们觉得数字信号处理的内容同现在标准的工程课程中讲授的经典网络和滤波器理论以及变换理论有很多共同之处，很值得保持这种形式的结构。所以在我们有意强调实用的设计和综合问题的同时，将力求不因此而削弱理论上的完整性。

1.2 数字信号处理概貌

近十年来，数字信号处理领域已迅速扩展到包含许多单独部门的程度，并为这些部门提供了牢固的理论基础。图 1.1 说明此领域怎样出现和扩展的情形。由于数字信号处理多半是依据离散时间线性非时变系统理论，在图中我们把这一理论作为统一整个领域的主要因素。

数字信号处理领域的两个主要分支是数字滤波和频谱分析。数字滤波领域进一步分成有限脉冲响应 (FIR) 滤波器和无限脉冲响应 (IIR) 滤波器。数字频谱分析领域进一步分为用离散傅里叶变换 (DFT) 的频谱计算和用统计方法对随机信号频谱的计算——例如数字系统中量化噪声频谱的计算。如 1.1 节中所述，在实际频谱分析技术中几乎无例外地采用快速傅里叶变换 (FFT) 和有关的快速卷积法。二维信号处理是一个比较新的领域，所以在图 1.1 中关于其发展方向标有一个问号。

数字信号处理的其余方面，如图 1.1 中所示是各种数字系统实现的重要课题以及应用范围。如果不同时对用有限精度的硬件或软件去实际实现这些系统所涉及的各种问题有充分的理解，几乎所有关于数字滤波器和频谱分析仪设计的理论上的考虑就不会有什么价值。所以，实现方面的问题首先与离散系统中量化的数学基础有关，其次是与要求用硬件还是

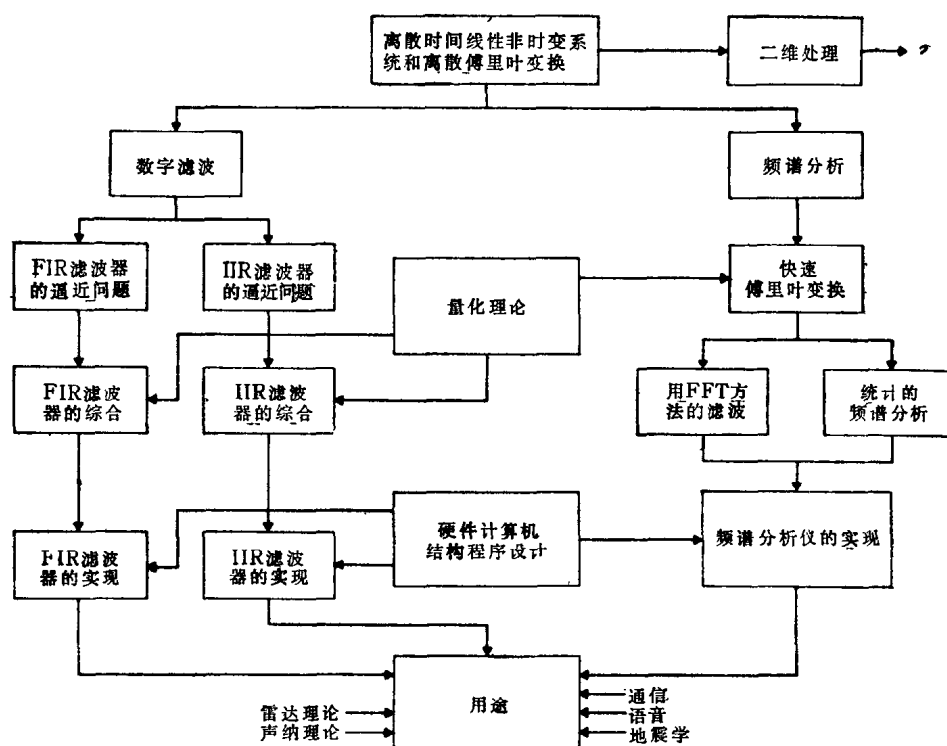


图1.1 数字信号处理概貌

用软件来实现有关，懂得这两种实现方法内在的限制和优点是重要的。

读者应该注意，图 1.1 中所列出的所有应用其范围正是在传统上是采用模拟元件来进行信号处理的领域。模拟方法已经取得了如此多的进展并且还在继续发展，因此出现了采用数字信号处理技术是否适宜等许多疑问。我们认为，答案要到科学和工程方法的极其核心的方面去找。鉴于工程问题的系统阐述经常如同那些所谓“软”的科学（如人类学、心理学等）那样不很明确，这些问题的解决显得越来越取决于精度和再现能力。例如人们曾不懈地试图更加精确地测量光速、普朗克常数和其她通用常数。还可以想一想为了取得频率和时间的标准所作过的巨大努力。所以，虽然许多信号处理系统用模拟方法来实现最经济，但数字系统具有达到工程师们所要求的有保证的精度和实际上完全再现的能力。从而这又将有助于刺激元件制造者重视提高数字工艺的方法，最终会使数字实现更为经济。总之，基于数字计算机已经胜过模拟计算机的同样理由，数字信号处理的重要性终将超过模拟信号处理的重要性。

1.3 本书内容的组成

图 1.1 对本书内容的组成提供了充分的介绍。第二章是对离散时间线性系统的理论基础的一般性讨论。在该章中不是想要介绍过多的理论而是提供全书将以之为依据的数字信号处理主要领域的梗概。该章还对 DFT 和快速卷积概念作了初步介绍。

第三章和第四章讨论数字滤波器的设计。第三章是关于 FIR 滤波器方面的理论，第四

章则是同 IIR 滤波器理论有关的内容。由于数字滤波器是大多数数字系统的重要组成部分之一，这两章力求对各种设计算法的性质给予尽可能完整的讨论。在第三章中对各种窗孔加权法、频域抽样设计和极小峰值误差设计作了详细的讨论并在可能时作了比较。由于已经证明极小峰值误差滤波器在切比雪夫 (Chebyshev) 滤波器的意义上是最优的，并且由于设计这种滤波器的算法 (包括 FORTRAN 程序) 已经发表，所以第三章的大部分篇幅致力于讨论这类滤波器和它们的特性。

在第四章中考虑了两类 IIR 滤波器的设计方法。第一类是经典的闭式方法，即利用适当的滤波器变换使一模拟滤波器数字化。微分映射法、脉冲响应不变变换法、双线性变换法与匹配零点和极点法都属于这一类设计方法。设计 IIR 滤波器的第二类方法是敞开式方法。即利用现代最优化算法按照某种指定的准则衡量为最优来设计滤波器。在这类方法中包括极小均方误差法、极小绝对误差法、等纹波法以及同规定的时间响应匹配的时域最优化法。不可能选出任何一种设计 IIR 滤波器的方法说它可以应用到所有感兴趣的场合。所以特别重要的是读者应充分懂得 IIR 滤波器的各种设计方法的性质，并知道它们的优点和限制。第四章中还包括一类 FIR 滤波器同一类“等效的”IIR 滤波器之间的某些简单比较。这样的比较使读者对这两大类滤波器在复杂性方面的权衡上能有所理解。

第五、第六和第七章的内容包括数字滤波器中有关量化数学的理论性讨论、频谱分析和 FFT 以及包括二维滤波器设计技术在内的二维系统的理论。这几章在很大程度上是本书其余各章所讨论的数字硬件和实际应用所必需的理论基础。

第五章讨论数字系统中量化的影响。引入了舍入误差、模数转换噪声和系数灵敏度的概念。关键性的结果是用定点实现直接式或级联式递归数字滤波结构中动态范围同舍入噪声之间的关系。由这种动态范围同舍入噪声的相互制约引出滤波器级联实现中节序安排和极点-零点配对的设想，以使能得到的滤波器信杂比最大。对于 FIR 滤波器，我们提出一种分析舍入噪声影响和确定滤波器变量比例值以防止在滤波器内出现溢出的方法。最后，我们介绍了 IIR 滤波器的相关舍入噪声或极限环的概念。

第六章对 FFT 作了相当全面的讨论，在数字信号处理中 FFT 也许是唯一最重要的算法。用相当简单的论述方法推导了人们熟知的按时间抽取和按频率抽取型式的基数 2FFT。介绍了 FFT 的一种统一的方法，在这种方法中一维变换被转换成尺寸小些的二维变换。这种统一的处理使我们对字位倒序、旋转因子和就地 (in-place) 等术语的概念得到颇为简单的解释。在讨论了 FFT 之后，我们对离散频谱分析作了比较概括的讨论。引入了滑动和跳动频谱的概念。说明了 FFT 频谱仪怎样才能做得同用一组带通滤波器组成的频谱分析仪等效。最后，对随机信号频谱分析的概念作了定量的阐述，并讨论了实现这种统计频谱分析的几种方法。该章的结尾是关于应用数论变换法计算卷积的讨论。

第七章对离散时间、线性、二维系统的理论作了初步的介绍，还对二维数字滤波器的设计方法作了一些讨论。理论的大部分类似于在第二章中介绍的用于一维系统的理论；但有几个重要的概念不能开拓到一维以上的系统中，在第七章中强调指出了这些概念。虽说二维的滤波器设计技术还不大成熟，但讨论了一种用于 FIR 滤波器的从一维到二维的绝妙的映射法，它被认为是设计二维滤波器当前可以采取的最好方法。

第八章到第十一章讨论专用数字硬件在数字信号处理问题中的应用。具体说，第八章

介绍数字硬件的初步知识。第九章讨论用于数字滤波的实现和专用硬设备的数字硬件；第十章研究用以实现 FFT 的硬件；第十一章讨论可编程序的信号处理计算机。

第八章的内容是为用硬件结构实现任何一种信号处理功能奠定基础的。介绍了数字系统中的关键性组成部分，如存储器、运算单元和控制逻辑的概念。讨论存储器和处理单元的各种方案。从运算速度、费用和复杂性诸方面讨论了加法器、减法器和乘法器的结构。

第九章对专用数字硬件如何能用来实现通用数字滤波器作了详细的叙述，也对数字信号产生器那样的硬件作了讨论。说明了 FIR 和 IIR 滤波器的硬件实现，随后介绍了几种系统，在这些系统中数字滤波器只不过是系统的几个部件中的一个。这类系统包括数字式按钮话机和数字式时分多路-频分多路转换器。多路或几个数字系统时分共用一个运算单元的设想，在这里从共同利用一部昂贵的硬件的成本效率方面作了讨论。在这一章中还讨论了用数字硬件产生正弦波和随机噪声信号的一些例子。

第十章对怎样用数字硬件来实现 FFT 作了充分的说明，它比用常规的软件算法能把速度提高几个数量级。还把并行运算、流水线和存储处理重叠等设想作为提高系统总通过率的途径进行了讨论。

第十一章讨论数字硬件在可编程序的高速专用信号处理机设计中的应用。这里所论述的是在林肯实验室设计和建造的快速数字处理机 (FDP)。这样一种高速处理机的结构所依据的理论，以及为了最优地利用这种机器的能力在程序设计上的考虑，都在该章中作了详细的说明。该章还简要地讨论了通用信号处理设备。

第十二章和第十三章举例说明全书讲述的思想如何应用于语音和雷达信号处理这些专门技术领域。这两章所介绍的设想只是用以说明数字信号处理理论的典型运用，而绝不是想列举所有可能的处理办法，甚至事实上也不是列举最好的解决办法。我们认为书中所介绍的用于解决语音和雷达方面问题的工程方法可以起到鼓励人们开扩思路的作用，以便为其它感兴趣的领域中的信号处理问题寻求更好和效能更高的各种算法。

总之，本书致力于介绍数字信号处理领域中的许多先进设想，这些介绍是针对研究生和工程师的程度进行的。

第二章 离散时间线性系统理论

2.1 引言

离散时间线性系统理论研究时域和频域中序列的表示和处理问题。在本章和本书的大部分章节中,我们将把各种序列当作是一种其诸元的幅值未经量化的序列来进行讨论。这就是假设序列的样本值及线性系统的系数的精度是无限位的,由此得到离散时间(连续幅值)系统理论的基本部分。然后我们将讨论幅值量化到一定精度的数字系统中有限字长的各种影响。

全书所要讨论的处理方法可以通过数字计算机进行模拟或用专用数字硬件来实现。在后面几章中我们将讨论特别适用于信号处理的计算机结构,和用以高效能实现数字系统所需硬件的构成。

2.2 序列

离散时间信号仅在自变量(时间)的离散值被定义。通常时间的量化是均匀的,即 $t = nT$, 式中 T 为时域样本间隔。离散时间信号在数学上可以表示为数的序列,这些数的大小构成一个数的连续统。序列可用下述任何一种方法来描述:

$$\{h(n)\} \quad N_1 \leq n \leq N_2 \quad (2.1a)$$

$$\{h(nT)\} \quad N_1 \leq n \leq N_2 \quad (2.1b)$$

$$h(n) \quad N_1 \leq n \leq N_2 \quad (2.1c)$$

$$h(nT) \quad N_1 \leq n \leq N_2 \quad (2.1d)$$

(2.1a) 和 (2.1c) 式可以用于非均匀抽样;而 (2.1b) 和 (2.1d) 式则明显假定是按时间均匀抽样的。

一个序列可以用几种方法来得到。一种特别简单的方法是产生一组数,并把它们按一定顺序排成序列。例如,数 $0, 1, 2, \dots, N-1$ 构成一个斜坡序列 $h(n) = n, 0 \leq n \leq N-1$ 。另一种方法是利用某种数值递归关系形成序列;例如由 $h(n) = h(n-1)/2$ 同初始条件 $h(0) = 1$ 得到序列 $h(n) = (1/2)^n, 0 \leq n \leq \infty$ 。第三种方法是通过对一连续时间波形进行均匀抽样,而用各样本的幅值来形成序列;即 $h(nT) = h(t)|_{t=nT}$, 式中 T 是抽样时间间隔。通常用模拟-数字(A/D)变换器来得到连续时间波形抽样的序列。[A/D变换器和数字-模拟(D/A)变换器的进一步讨论在第五章给出]。获得序列的前两种方法与任何时间坐标系无关,而第三种方法则与时间密切有关。因此我们看出,在某种意义上,(2.1)式中的所有表示式都可以用来正确描述序列。

能够用图形来描绘某个特定的序列经常是 useful 和有益的,为此图 2.1 的一种对偶表示法在全书中都将用到。[作为一个典型例子,图 2.1 中采用的是序列 $h(n) = n, 0 \leq n \leq N_1 - 1$ 。]上图在 n_0 的各个值处作适当长度的直线表示 $n = n_0$ 处的样本值。在许多情况下

不能画出每个单独的样本, 这时只要画出如图 2.1 所示的序列幅值的包络就可以了。

下面给出数字信号处理技术中经常用到的一些重要的序列, 并在图 2.2 中简略画出。图 2.2(a) 表示一个数字脉冲或称单位样本的 $u_0(n)$, 用下面的关系式定义为

$$u_0(n) = \begin{cases} 1 & n = 0 \\ 0 & n \neq 0 \end{cases} \quad (2.2)$$

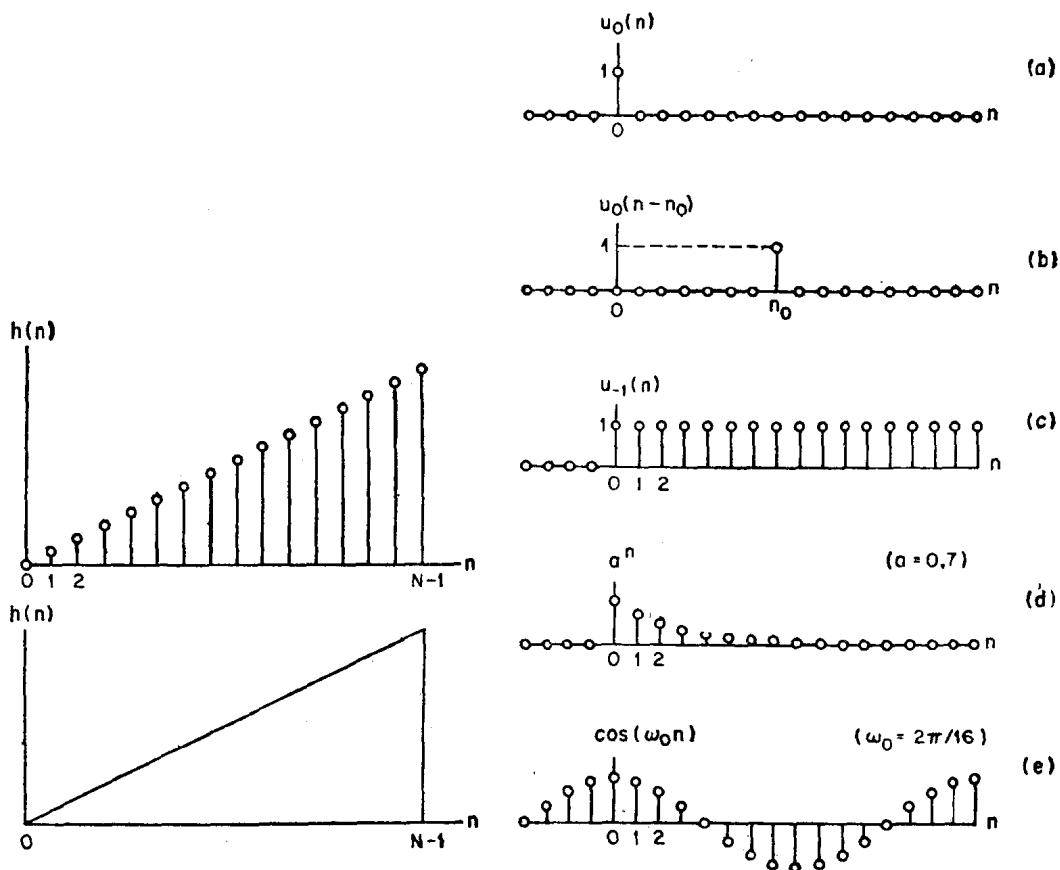


图 2.1 序列的表示

图 2.2 用于数字信号处理的重要序列

这个序列在时间离散系统中所起的作用同模拟脉冲狄拉克 $\delta(t)$ (Dirac delta) 函数 $\delta(t)$ 在连续时间系统中所起的作用差不多一样。它们的一个重要差别在于数字脉冲是一个可以解释得通的信号而模拟脉冲 $\delta(t)$ 仅在广义函数或分布的意义上存在。图 2.2(b) 表示延迟了 n_0 个样本的数字脉冲 $u_0(n - n_0)$ 并定义为

$$u_0(n - n_0) = \begin{cases} 1 & n = n_0 \\ 0 & n \neq n_0 \end{cases} \quad (2.3)$$

图 2.2(c) 表示单位阶跃序列 $u_{-1}(n)$, 定义为

$$u_{-1}(n) = \begin{cases} 1 & n \geq 0 \\ 0 & n < 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

很容易看出单位阶跃与数字脉冲有求和关系

$$u_{-1}(n) = \sum_{l=-\infty}^n u_0(l) \quad (2.5)$$

图 2.2 (d) 和 (e) 表示衰减的指数序列 $g(t)$ 和正弦序列 $h(n)$, 分别定义为

$$g(n) = \begin{cases} a^n & n \geq 0 \\ 0 & n < 0 \end{cases} \quad (2.6)$$

$$h(n) = \cos\left(\frac{2\pi n}{n_0}\right) \quad \text{全部 } n \text{ 值} \quad (2.7)$$

另一特别重要的序列是复指数序列 $e^{j\omega n} = \cos(n\omega) + j \sin(n\omega)$ 。由于这个序列是复数, 描写它就需要用单独的实数部分和虚数部分两个图形。以后我们将会看到上述许多序列在数字信号处理的理论研究所起到的重要作用。

2.3 任意序列的表示法

利用延迟基本数字脉冲并改变其比例的方法很容易表示任意的序列。考虑一个由数 $a(0), a(1), a(2), a(3), \dots$ 构成的序列, 令 $a(n)$ 表示序列第 n 个元的幅值。简单的表示法是

$$\{a(n)\} = \sum_{m=-\infty}^{\infty} a(m)u_0(n-m) \quad (2.8)$$

根据任意序列的基本表示法和离散、线性、非时变 (LTI) 系统的性质, 现在我们来推导表示 LTI 系统特性的方法。

2.4 线性、非时变系统

离散时间系统本质上是将一个序列 (称为输入) 变换为另一个序列 (称为输出) 的算法。图 2.3 给出离散时间系统的简单表示。输入为 $x(n)$, 输出为 $y(n)$, 输出与输入的函数关系为

$$y(n) = \phi[x(n)] \quad (2.9)$$

式中 $\phi(\quad)$ 由具体的系统确定。

图 2.3 离散时间系统的表示

线性系统是这样定义的: 如果 $x_1(n)$ 和 $x_2(n)$ 是线性系统的输入, $y_1(n)$ 和 $y_2(n)$ 是对应的输出, 则若用序列 $ax_1(n) + bx_2(n)$ 作为输入, 在输出端将得到序列 $ay_1(n) + by_2(n)$, 其中 a 和 b 为任意常数。

在非时变系统中, 如果输入序列 $x(n)$ 产生输出序列 $y(n)$, 则输入序列 $x(n-n_0)$ 便产生输出序列 $y(n-n_0)$, n_0 为任意值。

现在来证明线性、非时变系统的输入与输出序列之间存在卷积关系。设 $x(n)$ 为 LTI 系统的输入, $y(n)$ 为此系统的输出, 设 $h(n)$ 为系统对数字脉冲的响应。〔序列 $h(n)$ 称为脉冲响应或单位样本响应〕。由公式 (2.8) 我们能够把 $x(n)$ 写为

$$x(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(m)u_0(n-m) \quad (2.10)$$

因为 $h(n)$ 是对序列 $u_0(n)$ 的响应, 于是根据非时变性我们就能够说 $h(n-m)$ 是对

序列 $u_0(n-m)$ 的响应。同样根据线性关系, 对序列 $x(m)u_0(n-m)$ 的响应必定是 $x(m)h(n-m)$ 。因此, 对 $x(m)$ 的响应必然是

$$y(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(m)h(n-m) \quad (2.11a)$$

上式就是所要证明的卷积关系。通过简单的变量置换, 可以把(2.11)式转换成等值的形式

$$y(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} h(m)x(n-m) \quad (2.11b)$$

因此, 在 LTI 系统中, 序列 $h(n)$ 就完整地表示了该系统的特性, 如图 2.4 所示。

图 2.5 示出如何实际地实现卷积[(2.11)式]的简单图解表示。图 2.5(a) 表示一个

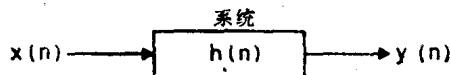


图 2.4 LTI 系统的表示

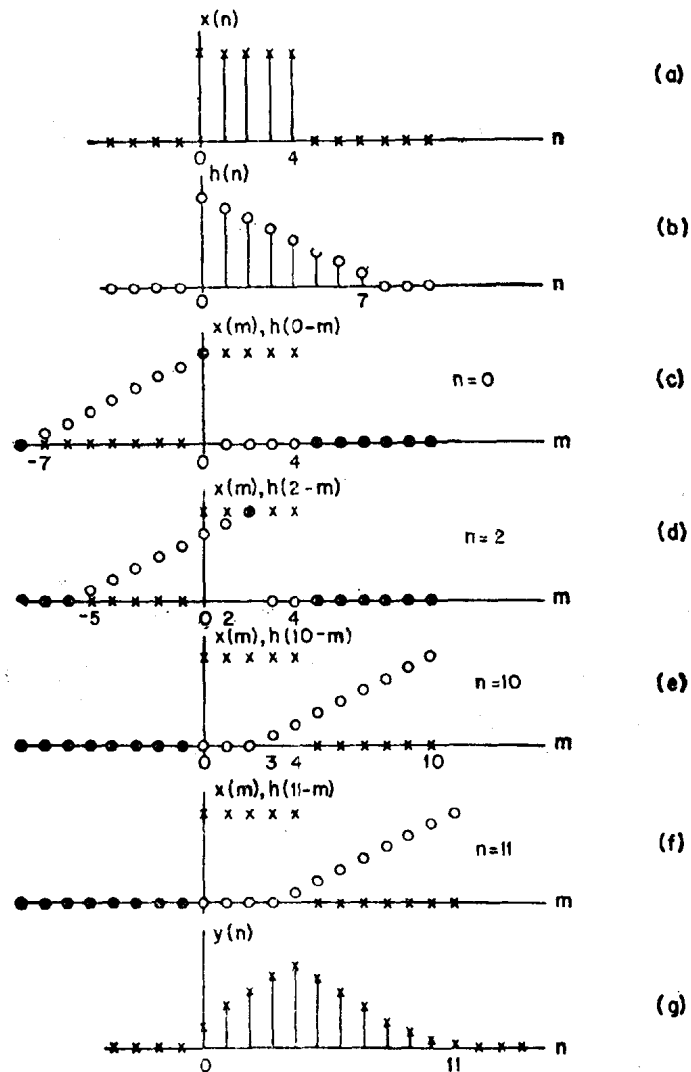


图 2.5 离散卷积的解释

在 $0 \leq n \leq 4$ 范围内不为零的典型输入序列 $x(n)$, 图 2.5 (b) 表示一个在 $0 \leq n \leq 7$ 范围内不为零的脉冲响应序列 $h(n)$ 。图 2.5 (c) 到 (f) 分别示出当 $n=0, 2, 10$ 和 11 时, 画在一起的 $x(m)$ 和 $h(n-m)$ 的图形, 显然对于 $n < 0$ 和 $n > 11$, $x(m)$ 同 $h(n-m)$ 没有重叠部分, 所以 $y(m)$ 完全为零。最后, 图 2.5 (g) 示出所求的卷积 $y(n)$ 。

2.5 因果性和稳定性

如果 $n = n_0$ 时的输出仅取决于 $n \leq n_0$ 时的输入值, 则此 LTI 系统称为因果性的或可实现的。对于 LTI 系统这意味着当 $n < 0$ 时脉冲响应 $h(n)$ 为零。在第三章和第四章中我们将看到有几种重要的系统是_{不可实现的}, 例如, 理想低通滤波器或理想微分器。因此滤波器理论中的一大部分是有关用一些可实现的系统去逼近一个不可实现系统的方法的。

如果每一有界输入产生一有界输出, 则称此系统是稳定的。脉冲响应稳定的充分必要条件是

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} |h(n)| < \infty \quad (2.12)$$

(2.12) 式的充分性和必要性容易证明如下。首先我们假设 (2.12) 式不成立, 即

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} |h(n)| = \infty \quad (2.13)$$

考虑如下定义的有界序列 $x(n)$

$$x(n) = \begin{cases} +1 & \text{当 } h(-n) \geq 0 \\ -1 & \text{当 } h(-n) < 0 \end{cases} \quad (2.14)$$

则由 (2.11) 式得出 $n=0$ 时的输出为

$$y(0) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(m) h(-m) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} |h(-m)| = \sum_{m=-\infty}^{\infty} |h(m)| = \infty \quad (2.15)$$

所以 $y(0)$ 不是有界的, 从而表明 (2.12) 式是稳定的必要条件。为了证明充分性, 设 (2.12) 式成立, 并设 $x(n)$ 为一有界输入序列, 即

$$|x(n)| \leq M \quad (2.16)$$

由 (2.11) 式求得

$$\begin{aligned} |y(n)| &= \left| \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(m) h(n-m) \right| \leq \sum_{m=-\infty}^{\infty} |x(m)| |h(n-m)| \\ &\leq M \sum_{m=-\infty}^{\infty} |h(n-m)| < \infty \end{aligned} \quad (2.17)$$