

[美] FRED J. Taylor 著

Digital Filters Principles and Applications with MATLAB

数字滤波器 原理及应用 (借助MATLAB)

程建华 袁书明 译
郝燕玲 赵琳 审校



国防工业出版社
National Defense Industry Press



WILEY

014009190

TN713
62

国家自然科学基金资助(61104036,61273081)

数字滤波器原理及应用 (借助 MATLAB)

Digital Filters Principles and Applications with MATLAB

[美] FRED J. Taylor 著
程建华 袁书明 译
郝燕玲 赵琳 审校



国防工业出版社

· 北京 ·



北航

C1695593

TN713
62

001800410

著作权合同登记 图字:军-2013-046 号

图书在版编目(CIP)数据

数字滤波器原理及应用:借助 MATLAB/(美)泰勒(Taylor, F. J.)
著;程建华,袁书明译. —北京:国防工业出版社, 2013.7

书名原文: Digital filters: principles and applications with MATLAB
ISBN 978-7-118-08910-3

I. ①数... II. ①泰... ②程... ③袁... III. ①数字滤波器 -
Matlab 软件 IV. ①TN713

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 212788 号

Translation from the English Language Edition:

Digital Filters: Principles and Applications with MATLAB

ISBN 978-0-470-77039-9

Copyright©2012

All right reserved. This translation published under John Wiley & Sons, Inc. .

No part of this book may be reproduced in any form without the written
permission of the original copyrights holder.

本书中文简体版由 John Wiley&Sons, Inc. 授权国防工业出版社独家出版发行。

未经出版者书面许可,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。

※

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)

北京奥鑫印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 787×1092 1/16 印张 16¼ 字数 371 千字

2013 年 7 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 58.00 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

译者序

随着计算机技术和信息科学的飞速发展,数字信号处理技术受到各领域越来越多的关注,已经逐渐发展成为一门独立的学科并成为信息科学的重要组成部分。在数字信号处理中,数字滤波技术占有重要的地位,几乎出现在所有的数字信号处理系统中。

相比较模拟滤波器,数字滤波器具有稳定、无漂移、精度高、参数容易控制等优势,决定了数字滤波器的应用越来越广泛。而 MATLAB 作为一种功能强大的数据分析和工程计算高级语言,在工业、电子、信号处理、医学、建筑以及航空等领域有着广泛的应用,其丰富的数字滤波器设计软件包,能有效、便捷地完成各种数字滤波器的设计、改进和验证。

FRED J. Taylor 是 Athena 集团董事会主席和共同创始人,现为佛罗里达大学电气工程和计算机与信息科学系教授,同时也是政府机构、工业领域、高等教育以及国家研究理事会的顾问。Taylor 教授长年从事数字信号处理,尤其是数字滤波器设计的相关研究工作,正如作者在序言中写到“我有幸目睹并经历了数字滤波器的一系列演变。”基于长期从事数字信号处理尤其是数字滤波器设计的深厚基础和研究成果,Taylor 教授撰写出版了《数字滤波器:原理和应用(借助 MATLAB)》,该书重点讲述了有限冲激响应滤波器(FIR)、无限冲激响应滤波器(IIR)和多采样率系统等主流数字滤波器的设计及分析方法。除介绍数字滤波器的新近相关技术外,还选取了丰富的素材,所提出的范例和设计思想适用于许多应用领域。采用 MATLAB 作为工具的大量实例,增加了可读性,使读者更容易理解和借鉴。本书的出版,将对数字滤波器分析和设计领域提供重要的学术理论和工程应用机制,为相关院校和科研院所开展相关技术研究,促使学生跟踪国际前沿提供有益的参考。

鉴于数字滤波器在各研究和应用领域的巨大需求,以及作者在数字滤波技术领域的深厚积累,我们组织翻译了《数字滤波器:原理和应用(借助 MATLAB)》。该书的翻译和审订由哈尔滨工程大学程建华副教授负责。前言、第1章至第6章由海军装备研究院袁书明高工翻译;第7章至第19章,术语表和中英文对照由哈尔滨工程大学程建华副教授翻译。

在翻译和出版中,哈尔滨工程大学郝燕玲教授和赵琳教授对译著书稿进行了认真、细致的审阅,并提出了许多宝贵的意见和建议,特此表示感谢。感谢国防工业出版社曲岩编辑对著作引进和出版提供的帮助。

感谢国家自然科学基金(61104036、61273081),中央高校科研业务费专项资金(HEUCFX41309)和参译人员所在单位对译著出版的支持。由于作者水平有限,翻译过程中难免存在不妥之处,敬请读者批评指正。

译者

2013年5月

前 言

数字滤波器的发展历史实质上始于 20 世纪 70 年代中期,与数字信号处理(DSP)这一研究领域同时出现。经过 30 余年的发展,数字滤波器已成为一种方便有效的支持技术,包括替代模拟滤波器,同时在通信、控制、国防、音频、生物医学、地球物理学、雷达、环境等众多应用领域中发挥作用。我有幸目睹并经历了数字滤波器的一系列演变。

数字滤波器是一种用数字方法改变信号属性的设备。所需的滤波器特性可以通过假定获得,也可以根据发布的标准确定,这些标准通过频率函数表征所需的幅值和相位特性。除改变信号属性外,数字滤波器还必须考虑许多其他的限制,如速度、复杂性、功率损耗、成本等因素。在种类繁多的数字滤波器中,有限冲激响应滤波器(FIR)、无限冲激响应滤波器(IIR)和多采样率系统是主体。因此,本书旨在介绍主流数字滤波器设计及分析方法。

在工程师职业的标准课程学习中,除学科训练外,他们还将设计或分析主流滤波器。但是,许多工程师和技术人员几乎没有正式的数字滤波器相关实践经验,幸运的是,如今的办公场所具备了丰富的、不同复杂程度的滤波器设计软件包,其中居于首位的是 Mathwork 开发的 MATLAB 软件。如今,随着 MATLAB 逐渐成为一种实际的标准,工程师和工科学生越来越依赖这些软件工具。然而,通过观察这些设计工具在办公场所和课堂里的使用情况,发现使用者面对过多的滤波器设计选项不知所措,经常设计出不符合应用的最优滤波器方案。另外,由于缺乏实践经验或对滤波器原理理解不深刻,使用者甚至无法对 MATLAB 设计结果进行微小改进。本书的出版目的在于提升读者对数字滤波器的理解,从而进行合适的设计,并能够改进计算机生成的设计结果。

事实上,使用诸如 MATLAB 设计主流数字滤波器是成功应用数字滤波器中最简单的一个步骤。通常情况下,软件和硬件实现才是更具挑战性的难题。MATLAB 等设计工具提供给用户一些基本的实现支持。然而,大多数工程师对 MATLAB 提供的实现选项缺乏理解。因此,本书的另一个目的在于培养滤波器实现技巧,补充现今有关数字滤波器的书籍和专刊中所缺少的一些内容。

本书按照既定的目标进行内容编排。首先介绍滤波器的基本原理,包括采样、数据获取、数据转换、数据量化和数据变换。其次介绍 FIR 滤波器的设计、实现及分析,主题是 FIR 特性、类型、特例及实现;随后介绍 IIR 滤波器的设计、实现及分析,主题同样是 IIR 特性、类型、特例及实现。另外说明如何将状态变量理解为 IIR 的一种结构表述语言。最后探究多采样率系统,内容包括从特性讨论到例题研究。大部分情况下,每一个题目都配有 MATLAB 举例和展示。

书中包含大量例题用于辅助滤波器学习,其中大多数涉及 MATLAB 的使用。读者可以从 John Wiley & Sons 的补充书籍材料网站 <http://booksupport.wiley.com> 上获得 MATLAB 示例及图形的脚本,并可在 MATLAB 的指令窗口中复制 MATLAB 脚本和重新赋予参数,来满足读者的滤波器应用需要。Rajneesh Bansal 先生对许多脚本进行了改进,在此致以真诚的谢意。

FRED J. Taylor

IEEE Fellow(会士)

名誉退休教授,佛罗里达大学

董事长、资深科学家,雅典娜集团公司

目 录

第 1 章 数字信号处理引言	1
1.1 引言	1
1.2 数字信号处理起源	1
1.3 信号域	3
1.4 信号分类	4
1.5 DSP: 一个学科	6
第 2 章 采样原理	8
2.1 引言	8
2.2 香农采样原理	8
2.3 信号重构	9
2.4 香农插值	10
2.5 采样方法	13
2.6 多通道采样	14
2.7 MATLAB 音频选项	15
第 3 章 混叠	16
3.1 引言	16
3.2 混叠	16
3.3 圆判据	19
3.4 IF 采样	20
第 4 章 数据转换和量化	22
4.1 域的转换	22
4.2 ADC 分类	23
4.3 ADC 增强技术	24
4.4 DSP 数据表示方法	25
4.5 量化误差	26
4.6 MAC 单元	29
4.7 MATLAB 支持工具	30
第 5 章 z 变换	31
5.1 引言	31
5.2 z 变换	32

5.3	原始信号	32
5.4	线性系统的 z 变换	33
5.5	z 变换特性	34
5.6	MATLAB z 变换设计工具	36
5.7	系统稳定性	36
5.8	逆 z 变换	38
5.9	赫维赛德展开法	38
5.10	逆 z 变换 MATLAB 设计工具	40
第 6 章	有限冲激响应滤波器	41
6.1	引言	41
6.2	FIR 滤波器	41
6.3	理想低通 FIR 滤波器	43
6.4	FIR 滤波器设计	44
6.5	稳定性	45
6.6	线性相位	46
6.7	群延迟	50
6.8	FIR 滤波器零点位置	51
6.9	零相位 FIR 滤波器	52
6.10	最小相位滤波器	53
第 7 章	窗函数设计法	56
7.1	有限冲激响应综述	56
7.2	基于窗函数的 FIR 滤波器设计	56
7.3	确定性设计	58
7.4	数据窗	59
7.5	基于 MATLAB 窗函数的 FIR 滤波器设计	61
7.6	Kaiser 窗函数	61
7.7	截尾型傅里叶变换设计方法	62
7.8	频率采样设计法	64
第 8 章	最小均方设计方法	66
8.1	有限冲激响应综述	66
8.2	最小二乘法	66
8.3	最小二乘 FIR 滤波器设计	67
8.4	MATLAB 最小均方设计	70
8.5	MATLAB 设计对比	73
8.6	PRONY 方法	73
第 9 章	等波纹设计方法	75
9.1	等波纹准则	75
9.2	雷米兹交换算法	76

9.3	加权等波纹 FIR 滤波器设计	80
9.4	希尔伯特等波纹 FIR 滤波器	83
9.5	等波纹滤波器阶次估计	84
9.6	MATLAB 等波纹 FIR 滤波器实现	85
9.7	L_p FIR 滤波器设计	86
9.8	基于 L_p 范数的 MATLAB 滤波器设计	87
第 10 章	FIR 滤波器特例	89
10.1	引言	89
10.2	滑动平均 FIR 滤波器	89
10.3	梳状 FIR 滤波器	90
10.4	L 波段 FIR 滤波器	91
10.5	镜像 FIR 滤波器	92
10.6	补码 FIR 滤波器	93
10.7	频率抽样滤波器组	94
10.8	卷积平滑 FIR 滤波器	96
10.9	非线性相位 FIR 滤波器	98
10.10	Farrow FIR 滤波器	99
第 11 章	FIR 的实现	100
11.1	概述	100
11.2	直接型 FIR 滤波器	100
11.3	转置结构	101
11.4	对称 FIR 滤波器结构	102
11.5	格型 FIR 滤波器结构	103
11.6	分布式算法	108
11.7	正则符号数	111
11.8	简化加法器图	112
11.9	FIR 有限字长效应	114
11.10	计算误差	117
11.11	缩放	119
11.12	多重 MAC 结构	119
第 12 章	经典滤波器设计	122
12.1	引言	122
12.2	经典模拟滤波器	123
12.3	模拟原型滤波器	125
12.4	巴特沃斯原型滤波器	125
12.5	切比雪夫原型滤波器	127
12.6	椭圆原型滤波器	130
12.7	原型滤波器到最终形式的转换	132

12.8	其他 IIR 滤波器形式	132
12.9	PRONY(PADE)法	133
12.10	尤尔—沃尔	133
第 13 章	无限冲激响应滤波器设计	135
13.1	引言	135
13.2	冲激响应不变法	135
13.3	冲激响应不变滤波器设计	136
13.4	双线性 z 变换法	139
13.5	翘曲	140
13.6	MATLAB IIR 滤波器设计	143
13.7	冲激响应不变与双线性 z 变换 IIR 对比	145
13.8	最优化	146
第 14 章	状态变量滤波器模型	148
14.1	状态空间系统	148
14.2	状态变量	148
14.3	模拟仿真	149
14.4	MATLAB 仿真	150
14.5	状态变量模型	152
14.6	基变换	153
14.7	MATLAB 状态空间	154
14.8	转置系统	157
14.9	MATLAB 状态空间算法结构	158
第 15 章	数字滤波器结构	160
15.1	滤波器结构	160
15.2	直 I、II 型结构	160
15.3	直 I、II 型 IIR 滤波器的 MATLAB 相关函数	162
15.4	直 I、II 型结构的 MATLAB 实现	165
15.5	级联型结构	165
15.6	一阶、二阶子滤波器	166
15.7	一阶、二阶子滤波器的 MATLAB 实现	168
15.8	并联型结构	170
15.9	级联/并联型结构的 MATLAB 实现	171
15.10	梯型/格型 IIR 滤波器	172
第 16 章	定点效应	175
16.1	背景	175
16.2	定点系统	175
16.3	溢出(饱和)效应	175
16.4	算法误差	176

16.5	系数敏感度	177
16.6	二阶子滤波器	181
16.7	标准 IIR 滤波器	182
16.8	缩放	186
16.9	极限环振荡	186
第 17 章	IIR 结构分析	189
17.1	溢出防范	189
17.2	L_p 范数界	189
17.3	L_2 溢出预防	190
17.4	L_2 范数测定	191
17.5	L_2 范数的附加说明	192
17.6	L_∞ 范数界	193
17.7	L_1 范数界	195
17.8	噪声功率增益	197
17.9	基于状态空间的噪声分析	199
17.10	相似变换	202
第 18 章	多采样率系统简介	203
18.1	背景	203
18.2	抽取	203
18.3	插值	205
18.4	采样率转换	206
18.5	多相表示法	207
18.6	子带滤波器	211
18.7	MATLAB	211
第 19 章	多采样率滤波器	215
19.1	引言	215
19.2	离散傅里叶变换(DFI)滤波器组	215
19.3	L 波段滤波器	217
19.4	正交镜像滤波器	217
19.5	多相表达式	221
19.6	掩频滤波器	222
19.7	级联积分梳状滤波器(CIC)	226
附录一	MATLAB	229
附录二	词汇表	233
附录三	中英文对照	240
参考文献		249

第1章 数字信号处理引言

1.1 引言

信号处理是关于创造、改进、操控、分析和显示信号信息及其属性的科学技术。有史以来,人类逐步成为杰出的信号处理者。人类拥有史上最强大的信号处理器——25W的“人类大脑”,其中10W实现信号处理。在这一点上,“大脑”相当于便携式英特尔奔腾Ⅲ处理器。随着人类的进化,其他有利因素也加入到人类信号处理系统中,例如,利用易于理解的演说、艺术作品和文字来记录信息等。在这个过程中,通信从局部扩展到全球,从全球扩展到银河系。电子学的出现,使现代信息革命成为可能。模拟电子学促进了各种创新发明的产生,如普通老式电话系统(POTS)、收音机、电视、雷达和声纳等,以及其他许多给人类的生活带来巨大变革的发明创造。半个世纪前数字技术的出现,人类目睹了一场真实的革新技术大爆发,利用功能相对应的数字技术完成了对许多现存模拟技术方案的替换。另外,数字技术的发展使许多前所未有的产品和技术相继出现,如数字娱乐系统、数码相机、数字移动电话等。在某种程度下,数字技术成为一种突破性技术,带来了之前人们不可想象的科技产品。现今,无所不在的个人数字计算机正是这样一个例子。

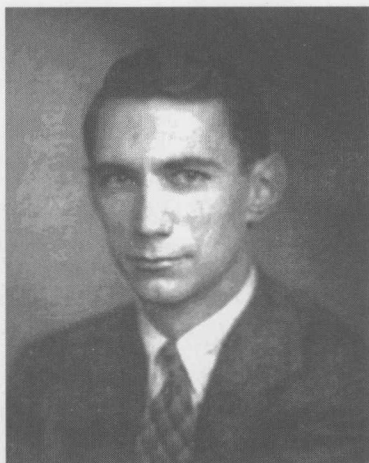
1.2 数字信号处理起源

无论是信号源,还是处理信息的设备型号,工程师和科学家习惯性地试图将信号减少为一组参数,以便采用数学方式进行控制、结合、分解、分析及存储。随着数字计算机的出现,这个技术难题得到了实现。人类与计算机的交互推进了数字信号处理(DSP)这一崭新科研领域的发展。一些学者认为,DSP起源于古代数学家发明的迭代计算算法。1202年,意大利数学家列奥纳多·比萨(又名斐波那契(Fibonacci^①))提出一种早期的离散数据产生方法。在假设每对成年兔子会生出一对幼崽的前提下,Fibonacci提出一种递推公式用来计算新生幼崽数。斐波那契预测公式为 $F_n = F_{n-1} + F_{n-2}$,初始条件为 $F_0 = 1, F_{-1} = 0$ 。由预测公式产生的离散时间序列估计兔子数量(一离散时间事件)为 $\{1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, 21, 34, 55, \dots\}$ 。然而,将上述方法作为数字信号处理产生的根据,则忽略了“数字”(D)这一概念的意义。在某种程度上,数字信号处理在处理过程中必须应用数字技术。

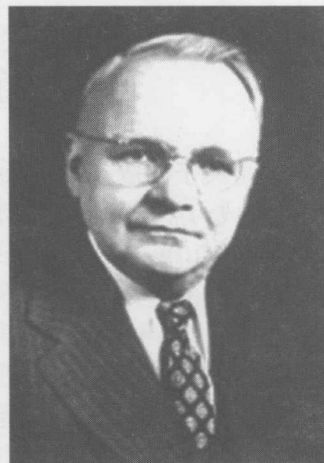
实际上,DSP创立于20世纪上半叶,促成变革的两个代表人物是克劳德·香农(Claude Shannon)和哈里·奈奎斯特(Harry Nyquist)。他们通过公式明确地表达出现今著名的采样理论,说明了如何用一组采样值表示一个连续时间信号。由于可以通过一组分布稀疏的采样值重建原始信号,因此这种表示法在数学上是极其完美的。奈奎斯特在

① Fibonacci 是 Filius Bonacci 的简写,意为 Bonacci 的儿子,该姓氏的意思为“善良的笨伙计”。

1928 年对采样理论进行推测和猜想,随后由香农在 1949 年完成该理论的数学证明。他们的工作推动了信号转换技术的发展,提出信号在连续时间域与离散时间域之间相互转换的理论方法。采样定理作为 DSP 建立的重要基础,在数字技术和计算代理之前便得到发展。而且,正是采样定理将模拟和离散时间采样域永久地联系起来,促成了现今的 DSP 技术。



克劳德·香农(1916—2001)



哈里·奈奎斯特(1889—1976)

20 世纪 50 年代至 60 年代初,数字计算机首次在技术领域得到应用。由于造价十分昂贵,这些早期的计算机一度被认为不能用于实际的信号分析,或者说,只能作为极少数工程师的实验室支持工具。1965 年,库利(Cooley)和图基(Tukey)提出了一种算法,即著名的快速傅里叶变换(FFT),改变了数字计算机不能广泛应用的状况。FFT 是一项突破性进展,因为它分析了当时冯·诺依曼(von Neumann)通用数字计算机结构的优缺点,并以此对计算傅里叶变换的代码进行了优化处理。通过在常规存储器中有效地分配数据以及采用顺序法进行计算,FFT 算法被巧妙地设计出来。然而,在 DSP 研究领域出现之前,早期的 FFT 使用者并不会认为他们是 DSP 工程师。

自 FFT 出现以来,得益于不断提高的计算效率和不断降低的数字技术成本(与摩尔定律相一致^①),数字计算得到持续发展。20 世纪 70 年代中期,数字系统如通用小型计算机,可以用离线方式运行信号处理程序。这种处理方式昂贵耗时,需要相当强的编程能力,并存在计算舍入问题,限制了其应用范围。在这个时代,早期的一些学者尝试使专用数字逻辑构建基本的数字滤波器和雷达相关器用于国防领域。这些成果使工程师和科学家首次意识到 DSP 的发展潜力,虽然当时还未出现真正的 DSP 研究领域,但是这一切即将改变。

1979 年,第一代 DSP 微处理器(DSP_{μp}) Intel 2920 的出现,悄无声息地带来了一场真正的变革。基于市场因素的考虑,当时的 Intel 2920 被称作“模拟信号处理器”,该处理器内置了片装的模/数转换器(ADC)、数/模转换器(DAC)和一个强大的运算器(能够在 200μs 内执行任何指令)。在促使了一连串重要事件的发生的同时,应用于少数 300b/s

^① 摩尔定律:预测集成电路上可容纳的晶体管数目,约每隔 18 个月会增加 1 倍。

调制解调器的 Intel2920,其市场却令人失望。尽管如此,Intel2920 却受到一小部分活跃的
数字音频实验者的热烈欢迎。随着第二代 DSP μ p(如德州仪器的 TMS320C10)的出现,
DSP 技术开始在众多新领域展示它的潜在价值。内嵌 DSP 的产品首次具有实用价值,标
志着 DSP 作为一项使能技术的创立。通过学术项目、期刊杂志和学会,以及发展基础工
艺,使得 DSP 这一研究领域得到了迅速发展,这些良好的开端迅速为第三代、第四代通用
DSP μ p 和专用 DSP 设备诞生开辟了道路。尽管 DSP 仅仅发展了几十年,仍是一门相对年
轻的学科,但它已经成为主要的经济力量和技术力量。现在,常规 DSP 方案的开发,都利
用现成的商用(COTS)软件、DSP μ p、现场可编程门阵列(FPGA)和专用集成电路(ASIC^①)
来完成。如今有大量的 DSP 软件设计和开发工具服务于这项产业。通过合理使用这些
资源,DSP 已成为高速、低成本的数据通信系统(Modem),数字控制器和无线设备(如移
动电话、个人通信设备、视频压缩、多媒体、视频和音频娱乐工具)等众多应用领域的一种
有效使能技术。成千上万的学者和技术人员是这场革新的核心力量。现在,他们把自己
称作 DSP 工程师和科学家。这些学者和技术人员是混合型工程师,因为他们不仅需要在
自己的领域具有较强的能力,即具有很强的电脑硬件能力和软件能力,同时,还需要理解
DSP 技术的理论和实践知识。这些 DSP 工程师和 DSP 技术一样,都处于成型阶段。此
时,可以准确地预言,DSP 技术将成为推动 21 世纪经济发展的一项重要技术。

1.3 信号域

自然世界和人工世界中都有着大量丰富的信号,尤其是自然世界。自然世界中的宇
宙射线、鸟鸣声甚至森林的落叶都存在多种多样的信号。自然世界中发现的信号是由各
种各样的机体产生的。生物的心电图信号如图 1.1 所示。其他如乐器产生的音乐或人类
的声音则为人造信号。人造信号可利用算法和电子声音复制设备创造,而无需由自然世

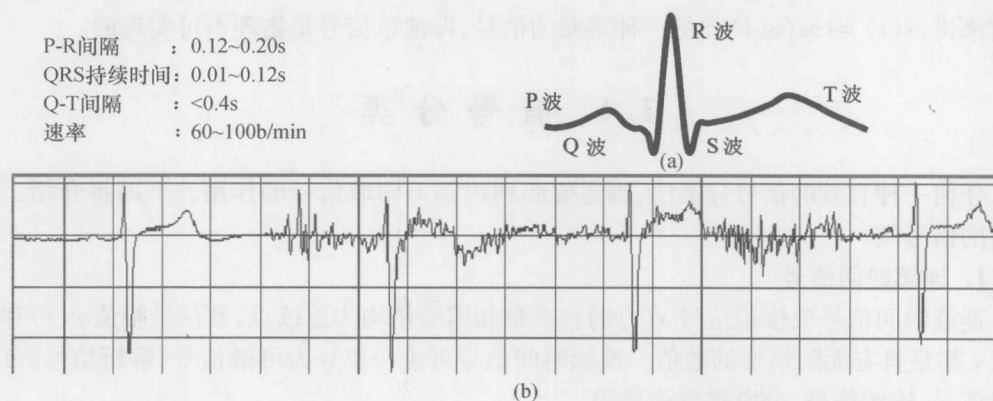


图 1.1 典型心电图模型和心电图记录

(a) 心电图波形; (b) 心电图记录。

① ASIC 是由解决方案提供商(而非制造商)所定义的,其延伸指特殊应用标准模块(ASSP),这是一种专门为高
容积商业用途而发展的 ASIC。

界的机体产生。这些信号可以分为一维、二维及多维信号。一个简单的一维正弦曲线 $x(t) = \cos(\omega t)$, 可以表示成振幅随时间变化的轨迹。图像通常属于二维信号, 可以表示成两个空间参数的函数, 如 $f(x_1, x_2) = \cos(\omega x_1 + \omega x_2)$ 。一张简单的黑白图像可以描述成一组图像值 $i(x, y)$, 图像值 $i(x, y)$ 表示在坐标 (x, y) 处的图像强度(图 1.2)。另外, 还存在更高维数的信号, 如道琼斯(Dow Jones)工业平均指数就是多维信号, 其本身是一个含有 30 个经济变量的函数。

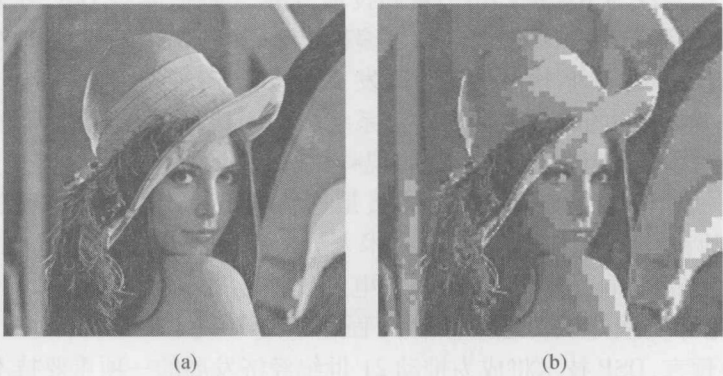


图 1.2 二维图像“Lena”
(a)512×512×8 位/像素图;(b)JPEG 压缩图像。

因果性也是信号的一项重要特性。因果信号由因果系统(非预测系统)产生, 因果系统在特定时刻 t_0 的输出 $y(t)$ 只取决于 $t \leq t_0$ 时刻的系统输入 $x(t)$ 。不具有因果性的信号为非因果信号或可预测信号^①。尽管非因果信号不是物理可实现的, 但在信号数学研究或者进行离散仿真方面, 非因果信号扮演了重要的角色。例如, 从技术角度看, 信号 $x(t) = \cos(\omega_0 t)$ 可以一直存在, 即 $t \in (-\infty, \infty)$, 因而该信号为非因果信号。但是从数学角度来讲, $x(t) = \cos(\omega_0 t)$ 却是一种重要的信号, 即使该信号是物理不可实现的。

1.4 信号分类

任何一种有效的信号分类法, 都需要起到识别不同域信号的作用。下面将介绍三种重要的信号域。

1. 连续时间信号

连续时间信号或模拟信号 $x(t)$ 的自变量和因变量均为连续点, 其信号幅值 $x(t)$ 和时间点 t 都是具有无限精度的数值。连续时间信号可进一步分为可微信号、解析信号、分段可微信号、连续信号、分段常数信号等。

2. 离散时间信号

利用理想采样器对连续时间信号 $x(t)$ 进行采样, 便获得离散时间信号 $x[k]$ 。如果 T_s

^① 可预测信号(Anticipatory), 出自旧约圣经中的箴言篇 18:13, “He who answers before listening — that is his folly and his shame”。

为采样周期,则 $f_s = 1/T_s$ 为采样率或采样频率,用来测量每秒采样数,单位为 Sa/s,通常与 Hz 交替使用。采样时刻 $t = kT_s$ 的采样值表示为 $x(t = kT_s) = x[k]$,称这些采样值的集合为时间序列。离散时间序列由采样值组成,这些采样值沿因变量坐标轴(幅值)是连续的,而沿自变量坐标轴(时间)是离散的。采样时刻是时间上离散的,采样值 $x[k]$ 是一个具有无限精度的实数或复数。离散时间信号是物理可实现的,将连续信号通过脉冲采样器或理想采样器这样的电子设备便可得到离散时间信号。采样值 $x[k]$ 利用插值这一反向转换过程构建连续时间信号 $y(t)$ 。取样保持(S/H)电路就是一种插值器,如图 1.3 所示。S/H 电路通常用于 DAC 的设计。另外,还可应用其他手段实现插值。

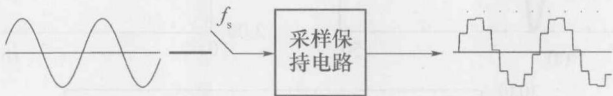


图 1.3 离散时间信号采样器和采样保持电路

离散时间信号可通过离散数学的计算算法产生。不仅如此,离散时间序列还出现在经济、生物、微积分、统计学、物理学等诸多领域中。离散时间信号的工程价值可追溯到第二次世界大战后时期,当时离散时间信号在采样数据控制器和电话通信中得到应用。在冷战早期阶段,战略轰炸机试图执行长时间、高精度导航的飞行任务,这对当时的模拟控制系统提出了很大挑战。因为操纵层面信号的微小漂移会随时间积累,从而导致很大的定位误差。这时,需要更为精准的自动驾驶技术。人们发现,如果对控制信号进行采样和调制,无漂移的交流(AC)放大器可取代易产生漂移的直流放大器(DC)。最简单的调制方案是利用斩波器,可获得符号交变周期模拟脉冲序列。调制后的信号传送到接收器中进行解调,便能将所有的采样值还原成原始信号。因此,采样数据控制技术应运而生,并在随后的二十世纪五六十年代得到大力发展。

这个时代中最经久不衰的技术产生于电话通信领域。人们发现许多明显的离散时间序列可以交错(如利用时分复用技术)到一个公用通道中,从而提升通道对单位时间内每条线路上用户数的承载能力。其结果是电话公司可以使用一条铜质线缆为多个客户端同时提供有偿服务。香农提出数学上的理论框架,利用该理论可实现信号沿公用通道的时分复用和传输,以及各独立接收机上的信号重建。香农的这一发明被称为香农采样定理,该项发明已成为推动众多 DSP 技术和方法发展的重要理论。

3. 数字信号

数字信号是离散时间信号,也是对因变量坐标值(幅值)的量化。数字信号可以由采用有限精度结构的数字计算机产生,也可使模拟信号 $x(t)$ 通过 ADC(A/D 转换器)产生离散时间信号的有限精度近似值。在任何一种情况下,量化原始信号的幅值都会产生量化误差这一不确定因素,控制和处理该误差通常是成功设计 DSP 方案的关键技术。

图 1.4 给出了一般的信号分类示意图。现今,典型的信号处理系统一般是模拟信号、离散信号、数字信号及系统的混合。起初,信号通常是连续时间域或模拟域,而数字信号是逐渐起支配作用并成为主要信号。曾经认为,只能采用模拟技术的应用领域,如声音记录 and 复制,已经发展为数字技术的天地。无线通信产业用数字信号正逐步替代无线广播、后端音频和信号解码部分中的模拟分量。现今的图像和视频信号通常采用数字信号进行

编码及解码。离散时间系统除作为 ADC 中的采样子系统(采用器)外,现在很少得到应用。采样定理的出现以及数字半导体工业产品的发展,是促使模拟信号处理向数字信号处理完成转变的重要因素。这条转变的桥梁一旦搭建起来,用数字技术代替一切可能的模拟技术便是合情合理的。

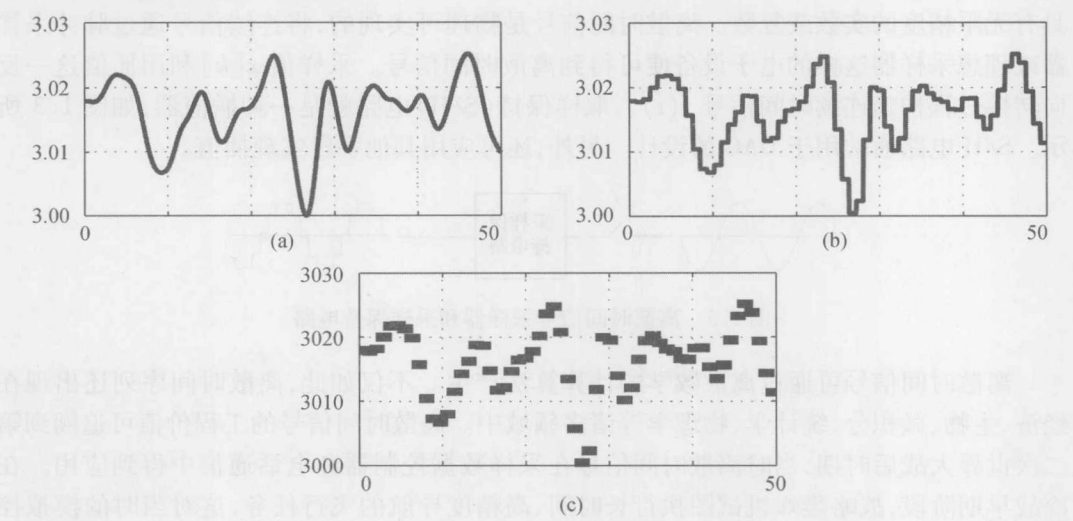


图 1.4 由模拟信号、离散时间信号或采样信号、数字或量化信号处理组成的信号分类
(a) 连续时间信号; (b) 离散时间信号; (c) 数字信号。

1.5 DSP: 一个学科

信号处理的发展得益于采样定理和其他相关的重要理论、研究方法和研究工具(如 FFT)等。起初,DSP 只是作为模拟技术的一种替代品出现,而现今,DSP 已走进很多新领域并成为 21 世纪最重要的信号处理技术。DSP 技术已发展成为一门基础深厚的学科,它可以实现很多技术方案,因此持续增加半导体市场份额。DSP 的优势总结如下文所述。

1. 数字技术优势

数字技术的特点如下:

(1) 通常,模拟系统和数字系统都可以制作成高度集成半导体系统。与模拟电路相比,数字设备可以充分利用亚微米技术并具有更高的电子密度,这使其在经济和性能方面形成优势。

(2) 由于半导体技术小型化(深亚微米)和信号电压的持续减小(1.25V 或更低电压),晶体管中固有的信噪比水平降低。数字系统对这些内部噪声具有更强的承受力,而这些技术对于模拟系统(相当于每个晶体管 3bit 精度)却没有价值。

(3) 数字系统可以工作在极低的频率上,这种极低的工作频率将要求模拟系统采用无法实现的大电容和大电阻值。

(4) 通过增加成本就可以设计出更高精度的数字系统,而模拟系统精度在物理实现上受到限制(10 bit ~ 60dB 的动态范围)。