

TURING

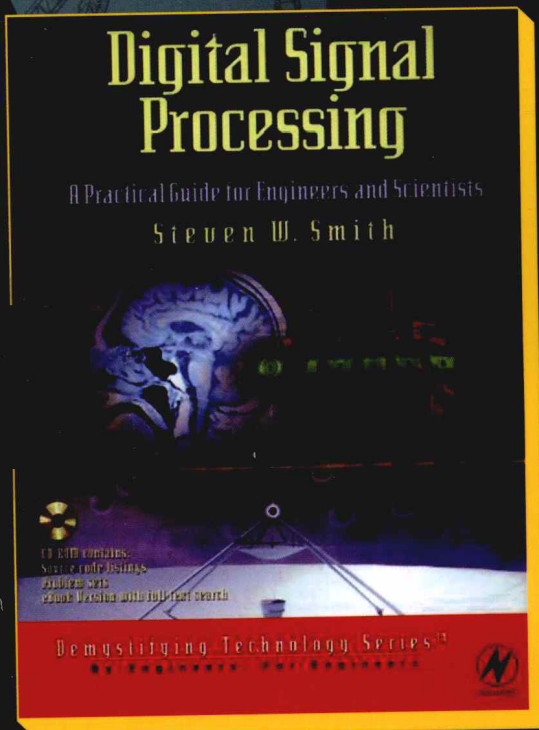
图灵电子与电气工程丛书

ELSEVIER
爱思唯尔

实用数字信号处理 从原理到应用

Digital Signal Processing
A Practical Guide for Engineers and Scientists

[美] Steven W. Smith 著
张瑞峰 詹敏晶 等译



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

TURING

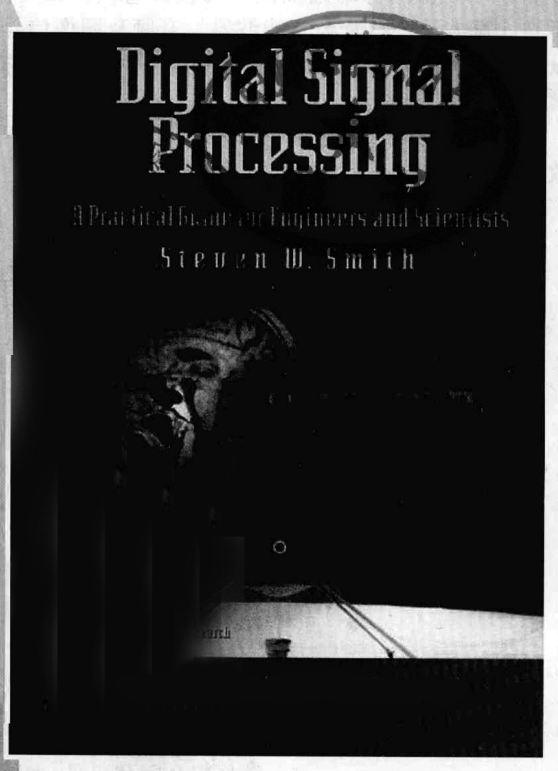
图灵电子与电气工程丛书

实用数字信号处理 从原理到应用

Digital Signal Processing

A Practical Guide for Engineers and Scientists

[美] Steven W. Smith 著
张瑞峰 詹敏晶 等译



人民邮电出版社
北京

图书在版编目 (CIP) 数据

实用数字信号处理：从原理到应用 / (美) 史密斯
(Smith, S.W.) 著；张瑞峰等译. —北京：人民邮电出版社，
2010.12

(图灵电子与电气工程丛书)

书名原文：Digital Signal Processing: A Practical Guide for
Engineers and Scientists

ISBN 978-7-115-23949-5

I. ①实… II. ①史… ②张… III. ①数字信号—信号
处理 IV. ①TN911.72

中国版本图书馆CIP数据核字 (2010) 第 189288 号

内 容 提 要

本书是数字信号处理领域的一本经典图书。书中内容既包含 DSP 应用领域概述，从概率统计的角度认识信号和噪声，模数和数模转换理论，DSP 领域的数字表示方法、类型和精度，硬件和软件对计算速度的影响等基础知识，又包含卷积、相关、离散傅里叶变换、快速傅里叶变换 (FFT) 等重要计算方法，以及数字滤波器、音频及图像信号的处理技术、神经网络、数据压缩等重要应用，并以美国 ADI 的产品为例介绍了 DSP 芯片的结构、特点、功能和开发套件；还包含了如何通过复数数学扩展 DSP 的功能。

本书内容全面，论述清晰，语言通俗，可作为高等院校通信与电子信息类专业本科生和研究生的教材或参考书，对相关领域的科研人员以及工程技术人员也具有很高的参考价值。

图灵电子与电气工程丛书

实用数字信号处理：从原理到应用

-
- ◆ 著 [美] Steven W. Smith
 - 译 张瑞峰 詹敏晶 等
 - 责任编辑 马晓燕
 - ◆ 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>
三河市潮河印业有限公司印刷
 - ◆ 开本：787×1092 1/16
印张：31.25
字数：820 千字 2010 年 12 月第 1 版
印数：1-3 000 册 2010 年 12 月河北第 1 次印刷
著作权合同登记号 图字：01-2008-3324 号

ISBN 978-7-115-23949-5

定价：85.00 元

读者服务热线：(010) 51095186 印装质量热线：(010) 67129223

反盗版热线：(010) 67171154

版 权 声 明

Digital Signal Processing: A Practical Guide for Engineers and Scientists by Steven W.Smith,
ISBN: 0-7506-7444-X.

Copyright © 2003 by Steven W.Smith. All rights reserved.

Authorized Simplified Chinese translation edition published by the Proprietor.

ISBN: 978-981-272-110-5.

Copyright © 2010 by Elsevier (Singapore) Pte Ltd. All rights reserved.

Elsevier (Singapore) Pte Ltd.

3 Killiney Road

#08-01 Winsland House I

Singapore 239519

Tel: (65)6349-0200

Fax: (65)6733-1817

First Published 2010

2010 年初版

Printed in China by POSTS & TELECOM PRESS under special arrangement with Elsevier (Singapore) Pte Ltd. This edition is authorized for sale in China only, excluding Hong Kong SAR and Taiwan. Unauthorized export of this edition is a violation of the Copyright Act. Violation of this Law is subject to Civil and Criminal Penalties.

本书简体中文版由 Elsevier (Singapore) Pte Ltd. 授权人民邮电出版社在中华人民共和国境内（不包括香港特别行政区和台湾地区）出版与销售。未经许可之出口，视为违反著作权法，将受法律之制裁。

译者序

本书的作者 Steven W. Smith 是 Spectrum san deigo 公司的总裁和技术总监，致力于医疗、安全和工业应用等领域先进图像系统的研发，主要研究方向为数字信号处理、模拟电子学、X 射线物理学和感知系统。本书通俗易懂，力图以最少的数学知识将 DSP 的基本概念、理论和方法陈述得透彻明了。这确非易事，而作者通过深入浅出的文字、形象精致的图片、恰当的实例和简单易懂的源代码非常好地做到了这一点，使 DSP 的学习无须面对复杂的理论公式，而且可以提高读者解决实际问题的能力，这是作者多年从事 DSP 相关产品研发的实践经验的积累总结，表明其对于数字信号处理的基本概念和理论有非常深刻的理解，因为只有自己真正理解了，才有可能表述得让别人也能很清楚地理解。另外作者已将本书的英文电子版上传到了个人主页 (www.dspguide.com)，可供读者免费下载，为了便于交流，还给出了作者的博客链接。

这本 DSP 教材具有以下特色。

(1) 受众指向明确。适合各个科学和工程领域里实际应用 DSP 技术的人员，尤其适用于希望在自己熟知的研究领域里引入 DSP 技术以提升性能的情况。另外此书也适用于 DSP 技术的初学者，是一本很好的 DSP 技术入门书籍。

(2) 对于一个具体的知识点，作者会通过三个步骤进行说明，首先是文字解释，然后是简易的数学表达，最后是相关程序代码。因此，如果通过一种方式未能理解，那么还有两种途径做备份。而且，即使通过其中一种方式理解了这个概念，也还有另外两种方式可以帮助读者加深强化。

(3) 作者善于应用举例和图片方式展开陈述，整本书精心绘制选择了 500 多幅图片，对于很多重要的 DSP 概念解释得非常清楚，比如卷积和相关的计算过程、离散傅里叶变换和快速傅里叶变换的计算、数字滤波器的设计等。

(4) 作者能够从读者的角度出发思考问题，对许多在理解以及使用时容易出错的技术细节给出了详细的提示。论述音频信号时从人耳的结构入手，论述图像信号时又从仔细分析了眼睛的结构和功能，使读者能够弄清事物的来龙去脉，从而抓住问题的实质和根本。

(5) 全书采用 Basic 语言编写代码，实际上采用何种语言并不重要，语言只是工具，重要的是程序的算法和思想，这才是灵魂和精华所在，掌握了它就可以根据自己的需要将这些算法很方便地“移植”到所熟悉的语言中，所以虽然作者在书中将很多非常巧妙的算法以 Basic 语言的形式表述出来，但丝毫不会影响到对于广大读者的借鉴意义。

本书由张瑞峰翻译，李镛审校。参加本书翻译和初校工作的还有詹敏晶、李可佳、赵景科、甄蛟龙、张为等，图灵公司的编辑为本书的后期制作做了大量的文字工作，因此该书的翻译出版是集体智慧的结晶，在此向所有为本书的出版提供了帮助的人表示感谢！

由于译审者水平有限，加之时间仓促，译文中难免有不妥乃至错误之处，敬请广大读者不吝指正。

张瑞峰

2010 年 8 月

序 言

目标和策略

科技界的变化日新月异。短短 15 年里，个人计算机的性能就获得了近千倍的提升。据报道，在未来的 15 年内还将继续保持这样的增长势头。计算机强大的性能改变了科学和工程界的工作方法，数字信号处理就是最好的例证。

在 20 世纪 80 年代早期，DSP 被作为电子工程专业的研究生课程进行讲授。10 年后，DSP 成为大学本科生的必修课程。今天，DSP 已经是诸多领域的科技人员所必须掌握的基本技能。但是，DSP 教育却没能跟上这一变化。几乎所有的 DSP 课本内容仍然是传统的电子工程课本模式，满篇都是枯燥的数学公式。DSP 具有令人难以置信的强大功能，但如果不能理解它，那么还是无法使用它。

本书是为各个领域的科研人员撰写的：物理学、生物工程、地质学、海洋学、机械和电子工程，等等。其目的是为了介绍实用技术，并力求避开复杂数学推导和抽象的理论。为了实现这一目标，本书在撰写时采用了以下 3 个策略。

首先，解释各种技术方法，而不是简单地通过数学推导证明其正确性。虽说书中包含大量数学概念，但我并没有把这些概念作为传达信息的主要手段，而是通过叙述清晰的文字辅以插图来讲述内容的。

其次，将复数作为一个高级主题来处理，学习完基本原理后再作介绍。第 1~29 章讲解的基本方法仅使用了代数，只在极少数实例中涉及少量的初等微积分。第 30~33 章介绍了如何通过复数扩展 DSP 的功能，展示了仅采用实数无法实现的技术。这种方法令人耳目一新，因为传统的 DSP 教科书通常从第 1 章开始就满篇都是复数数学。

再次，使用非常简单的计算机程序。大多数 DSP 程序都是采用 C 语言、Fortran 语言等编写的。然而，学习 DSP 的要求与使用 DSP 的要求不同。学生需要把精力集中在算法和技巧上，而不是转移到对某种具体语言的探究中。功能和灵活性不是最重要的，关键是简洁明了。本书的程序追求以最简单易懂的方式讲授 DSP，其他要求都被放在了第二位。即使好的编程风格能够使程序的逻辑变得更清晰，但在本书中也未被采用。本书的程序有如下特点：

- 使用了简化版的 Basic；
- 标有行号；
- 只使用了 FOR-NEXT 循环控制结构；
- 没有输入/输出语句。

这是笔者所能找到的最简单的编程风格。有人可能认为如果能采用 C 语言编写其中的程序会更好，笔者完全不赞同这种观点。

书中的习题答案和程序源代码已包含在本书附属资源内，读者可以登录图灵网站 (<http://www.turingbook.com>)，免费注册后下载。

读者对象

本书适合作为理工科学生两个学期的 DSP 课程教材。建议在学习本门课程之前，掌握如下

知识:

- 实用电子学方面的课程 (运算放大器和 RC 电路等);
- 计算机编程方面的课程 (Fortran 或类似语言);
- 微积分课程。

本书也适合具有一定实际经验的科研人员。书中讨论了一些 DSP 的日常应用,如数字滤波器、神经网络、数据压缩、音频和图像处理等。这些内容基本都是独立的章节,不需要读者为了弄清一个具体问题而回顾全书。

致谢

特别感谢为本书提供意见和建议的审阅者。正是他们无私奉献了大量时间和智慧才使本书更完美: Magnus Aronsson (犹他大学电气工程系), Bruce B. Azimi (美国海军), Vernon L. Chi (北卡罗莱纳大学计算机科学系), Manohar Das 博士 (奥克兰大学电气与系统工程系), Carol A. Dean (ADI), Fred DePiero 博士 (加州技术州立大学电气工程系), Jose Fridman 博士 (ADI), Frederick K. Duennebier 博士 (夏威夷大学地质与地球物理学系), D.Lee Fugal (空间信号技术公司), Filson H. Glanz 博士 (新罕布什尔大学电气与计算机工程系), Kenneth H. Jacker (阿巴拉契亚州立大学计算机科学系), Rajiv Kapadia 博士 (曼凯托州立大学电气工程系), Dan King (ADI), Kevin Leary (ADI), A. Dale Magoun 博士 (东北路易斯安那大学计算机科学系), Ben Mbugua (ADI), Bernard J. Maxum 博士 (拉马尔大学电气工程系), Paul Morgan 博士 (北亚利桑那大学地质系), Dale H. Mugler 博士 (阿克伦大学数学系), Christopher L. Mullen 博士 (密西西比大学土木工程系), Cynthia L. Nelson 博士 (Sandia 国家实验室), Branislava Perunicic-Drazenovic 博士 (拉马尔大学电气工程系), John Schmeelk 博士 (弗吉尼亚州立大学数学系), Richard R. Schultz 博士 (北达科他大学电气工程系), David Skolnick (ADI), Jay L. Smith 博士 (韦伯州立大学宇航技术中心), Jeffrey Smith 博士 (佐治亚大学计算机科学系), Oscar Yanez Suarez 博士 (墨西哥 Iztapalapa 大都会大学电气工程系), 以及许多希望匿名的审阅者。

正在阅读本书的你也是一位审阅者,恳请你花一些时间为此书提出意见和建议,以便再版时能更好地满足你的需要。可以花两分钟时间将这些内容发电子邮件给我: Smith@DSPguide.com。多谢。希望你能喜欢此书。

Steven W. Smith 于 1999 年 1 月

目 录

第 1 章 DSP 应用领域及影响 1	4.2 定点 (整数) 52
1.1 数字信号处理的起源 1	4.3 浮点 (实数) 54
1.2 电信 3	4.4 数字精度 55
1.2.1 复用 3	4.5 执行速度: 程序语言 59
1.2.2 压缩 3	4.6 执行速度: 硬件 61
1.2.3 回声控制 4	4.7 运行速度: 编程技巧 64
1.3 音频处理 4	第 5 章 线性系统 67
1.3.1 音乐 4	5.1 信号与系统 67
1.3.2 语音产生 4	5.2 线性的要求 68
1.3.3 语音识别 5	5.3 静态线性和正弦保真性 71
1.4 回声定位 5	5.4 线性和非线性系统的例子 73
1.4.1 雷达 5	5.5 线性的特殊性质 74
1.4.2 声呐 6	5.6 叠加: DSP 的基础 75
1.4.3 反射地震学 6	5.7 常见的分解 76
1.5 图像处理 6	5.7.1 脉冲分解 76
1.5.1 医疗 7	5.7.2 阶跃分解 77
1.5.2 空间 7	5.7.3 奇偶分解 79
1.5.3 商业化图像产品 7	5.7.4 交错分解 79
第 2 章 统计、概率和噪声 9	5.7.5 傅里叶分解 80
2.1 信号与曲线 9	5.8 线性的选择 82
2.2 平均值和标准偏差 10	第 6 章 卷积 83
2.3 信号与基本过程 14	6.1 函数和冲激响应 83
2.4 直方图、概率质量函数和概率密度函数 15	6.2 卷积 84
2.5 正态分布 20	6.3 输入端算法 86
2.6 数字噪声的产生 23	6.4 输出端算法 89
2.7 精度和准确度 25	6.5 输入信号的加权和 94
第 3 章 模数转换与数模转换 28	第 7 章 卷积的性质 96
3.1 量化 28	7.1 常见的冲激响应 96
3.2 抽样定理 30	7.1.1 δ 函数 96
3.3 数模转换 36	7.1.2 类微积分的运算 98
3.4 用于数据转换的模拟滤波器 38	7.1.3 低通滤波器和高通滤波器 100
3.5 抗混叠滤波器的选择 43	7.1.4 因果与非因果信号 102
3.6 多抽样率数据转换 46	7.1.5 零相位、线性相位和非线性相位 102
3.7 单比特数据转换 47	7.2 数学性质 103
第 4 章 DSP 软件 52	7.2.1 交换律 103
4.1 计算机的数 52	7.2.2 结合律 104

7.2.3	分配律	104	11.3	其他变换对	172
7.2.4	输入和输出间的转移性	105	11.4	吉布斯效应	172
7.2.5	中心极限定理	106	11.5	谐波	175
7.3	相关	106	11.6	啁啾信号	177
7.4	速度	110			
第 8 章	离散傅里叶变换	111	第 12 章	快速傅里叶变换	179
8.1	傅里叶变换	111	12.1	用复数 DFT 计算实数 DFT	179
8.1.1	非周期-连续	112	12.2	FFT 的工作原理	181
8.1.2	周期-连续	112	12.3	FFT 程序	184
8.1.3	非周期-离散	112	12.4	速度和精度的比较	189
8.1.4	周期-离散	114	12.5	进一步提高速度	190
8.2	实 DFT 的符号和格式	115	第 13 章	连续信号处理	195
8.3	频域自变量	117	13.1	δ 函数	195
8.4	DFT 的基本函数	118	13.2	卷积	197
8.5	DFT 逆运算的合成、计算	120	13.3	傅里叶变换	201
8.6	分析、计算 DFT	124	13.4	傅里叶级数	203
8.6.1	用联立方程计算 DFT	124	第 14 章	数字滤波器导论	208
8.6.2	通过相关性计算 DFT	125	14.1	滤波器基本知识	208
8.7	对称性	127	14.2	信息在信号中如何表示	211
8.8	极坐标表示法	128	14.3	时域参数	211
8.9	极坐标缺点	130	14.4	频域参数	213
8.9.1	缺点 1: 弧度和角度	131	14.5	高通、带通和带阻滤波器	215
8.9.2	缺点 2: 被 0 除的错误	131	14.6	滤波器分类	218
8.9.3	缺点 3: 反正切错误	131	第 15 章	移动平均滤波器	220
8.9.4	缺点 4: 非常小量的相位	131	15.1	卷积法	220
8.9.5	缺点 5: 相位的 2π 不确 定性	132	15.2	降低噪声与阶跃响应	221
8.9.6	缺点 6: 幅值总是正值 (相角 的 π 不确定性)	133	15.3	幅频响应	221
8.9.7	缺点 7: π 与 $-\pi$ 之间的尖峰 信号	133	15.4	类移动平均滤波器	222
			15.5	递推法	224
第 9 章	离散傅里叶变换的应用	135	第 16 章	加窗 sinc 滤波器	227
9.1	信号的谱分析	135	16.1	加窗 sinc 滤波器的原理	227
9.2	系统频域响应	141	16.2	滤波器设计	230
9.3	在频域计算时域卷积	143	16.3	加窗 sinc 滤波器的实例	231
			16.4	逼近极限	233
第 10 章	傅里叶变换的性质	148	第 17 章	任意频响滤波器	237
10.1	傅里叶变换的线性	148	17.1	任意频率响应	237
10.2	相位特性	149	17.2	退卷积	239
10.3	DFT 的周期性	154	17.3	最佳滤波器	245
10.4	压缩和扩展, 多抽样频率法	160	第 18 章	FFT 卷积	248
10.5	信号乘法 (调幅)	162	18.1	交叠相加法	248
10.6	离散时间傅里叶变换	164	18.2	FFT 卷积	249
10.7	帕斯瓦尔定理	165	18.3	速度改善	253
第 11 章	傅里叶变换对	167	第 19 章	递归滤波器	254
11.1	Δ 函数对	167	19.1	递归方法	254
11.2	sinc 函数	168			

19.2	单极点递归滤波器	256	第 26 章 神经网络	356	
19.3	窄带滤波器	259	26.1	目标检测	356
19.4	相位响应	260	26.2	神经网络结构	361
19.5	使用整数	264	26.3	为什么起作用	365
第 20 章 切比雪夫滤波器		265	26.4	训练神经网络	366
20.1	切比雪夫和巴特沃斯响应	265	26.5	结果评估	372
20.2	滤波器设计	266	26.6	递归滤波器设计	374
20.3	阶跃响应的过冲	270	第 27 章 数据压缩	379	
20.4	稳定性	270	27.1	数据压缩策略	379
第 21 章 滤波器的比较		275	27.2	游程编码	380
21.1	第 1 回合: 模拟滤波器与数字 滤波器	275	27.3	霍夫曼编码	381
21.2	第 2 回合: 加窗 sinc 与切比雪夫	277	27.4	Δ 编码	383
21.3	第 3 回合: 移动平均与单极点	279	27.5	LZW 压缩	384
第 22 章 音频处理		281	27.6	JPEG (变换压缩)	390
22.1	人类的听觉	281	27.7	MPEG	396
22.2	音色	283	第 28 章 数字信号处理器	397	
22.3	音质与数据速率	286	28.1	DSP 与其他的微处理器有什么 不同	397
22.4	高保真音频	286	28.2	循环缓冲	399
22.5	压缩	289	28.3	数字信号处理器的结构	401
22.6	语音合成与识别	290	28.4	定点和浮点	405
22.7	非线性音频处理	293	28.5	C 和汇编	410
第 23 章 图像的形成及显示		296	28.6	DSP 的速度有多快	414
23.1	数字图像的结构	296	28.7	数字信号处理器的市场	418
23.2	照相机和眼睛	298	第 29 章 数字信号处理器入门指南	421	
23.3	电视信号	304	29.1	ADSP-2106x 系列	421
23.4	其他图像获取和显示	305	29.2	SHARC EZ-KIT Lite 评估套件	422
23.5	亮度和对比度调节	306	29.3	设计实例: FIR 音频滤波器	423
23.6	灰度变换	309	29.4	DSP 系统中的模拟测量	426
23.7	扭曲	311	29.5	定点和浮点的另外一种看法	428
第 24 章 线性图像处理		314	29.6	先进的软件工具	430
24.1	卷积	314	第 30 章 复数	434	
24.2	3×3 边缘修正	318	30.1	复数体系	434
24.3	可分解卷积	319	30.2	极坐标表示法	436
24.4	大点扩散函数实例: 照明平坦化	321	30.3	复数代换法	438
24.5	傅里叶图像分析	324	30.4	正弦曲线的复数表示法	440
24.6	FFT 卷积	328	30.5	系统的复数表示法	441
24.7	图像卷积的进一步探讨	331	30.6	电路分析	442
第 25 章 特殊成像技术		334	第 31 章 复数傅里叶变换	445	
25.1	空间分辨率	334	31.1	实数 DFT	445
25.2	抽样间隔和抽样孔径	339	31.2	数学等价	446
25.3	信噪比	341	31.3	复数 DFT	446
25.4	形态学图像处理	344	31.4	傅里叶变换家族	450
25.5	计算机断层成像 (CT)	349	31.4.1	4 种傅里叶变换	450
			31.4.2	实数和复数	450

31.4.3 分析和合成	450	第 33 章 z 变换	471
31.4.4 时域符号	450	33.1 z 域的本质	471
31.4.5 频域符号	450	33.2 递归系统分析	474
31.4.6 分析式	450	33.3 串联和并联	478
31.4.7 合成式	451	33.4 谱倒置	480
31.4.8 缩放	451	33.5 增益改变	482
31.4.9 变形	451	33.6 切比雪夫-巴特沃斯滤波器设计	483
31.5 为什么要用复数傅里叶变换	451	33.6.1 循环控制	483
第 32 章 拉普拉斯变换	454	33.6.2 系数组合	483
32.1 s 域的特性	454	33.6.3 在 s 平面计算极点位置	484
32.2 拉普拉斯变换的应用	459	33.6.4 从圆变到椭圆	484
32.3 电路分析	462	33.6.5 连续到离散的转换	486
32.4 极点和零点的重要性	465	33.6.6 低通到低通的频率变换	487
32.5 在 s 域中设计滤波器	467	33.6.7 低通到高通的频率变换	488
		33.7 最好和最差的 DSP	488

第 1 章 DSP 应用领域及影响

数字信号处理是能够改变 21 世纪科学和工程面貌的最强大的技术之一。它在诸多领域内已经引发了革命性的变化：通信、医学成像、雷达和声呐、高保真音乐复制以及油田勘探等，这里只列出了一部分领域。每个领域都结合自己的算法、数学知识和专业技术对 DSP 技术展开了深入的研究。这种广度和深度的结合使得任何一个人都不可能精通所有的已经成形的 DSP 技术。DSP 的教学有两个主要任务：学习适用于整个领域的通用概念，学习用户所感兴趣领域的专门技术。本章将着重描述 DSP 技术在一些不同领域所产生的引人注目的影响。

1.1 数字信号处理的起源

数字信号处理使用一种独特的数据类型——信号，这有别于计算机科学的其他领域。在大多数情况下，这些信号源于现实世界的测量数据：地震震动、视觉图像、声音波形等。DSP 是在它们被转换成数字化的形式以后对这些信号进行处理的数学、算法和技术。这样做的目的有很多，比如：图像的加强，语音的识别和生成，数据的压缩存储和传输等。假设我们把一个模数转换器连接在计算机上，通过它来获取现实世界的大量数据。下一步应该做什么？答案就是 DSP。

DSP 起源于 20 世纪六七十年代，即数字计算机出现时。当时计算机的价格非常昂贵，所以 DSP 仅用于一些关键的应用领域。最初的尝试发生在 4 个关键领域：雷达和声呐，在国防领域具有重要作用；石油勘探，从中可以获取巨大的经济利益；空间探测，其数据的重要性是无以替代的；医学成像，可以挽救人的生命。20 世纪 80 年代和 90 年代的个人计算机革命使得 DSP 有了更多的应用领域。DSP 的发展不是被军事或者政府需要所推动的，而是受到了商业市场的促进。想在这一快速发展的领域赚取经济利益的人迅速成为了 DSP 产品的供应商。面向公众的 DSP 产品有：移动电话、CD 播放器、电子语音邮件。图 1-1 列出了一些不同的应用领域。

技术的革命是自顶向下发生的。在 20 世纪 80 年代前期，DSP 是电子工程研究生的一门课程。10 年以后，DSP 成为了本科生的标准课程。现在，DSP 是许多领域的科学家和工程师所必需的基本技能。作为一个类比，DSP 可以和以前的一个技术革命——电子技术相提并论。虽然仍然处于电子工程的领域，但几乎所有的科学家和工程师都具备一些基本的电路设计的背景知识。如果没有这些相关知识，他们将无法在技术领域立足。DSP 也具有同样的特点。

列出以上这些近年来的发展过程不仅仅是为了满足你的好奇心，更因为它还将对你学习和使用 DSP 产生很大的影响。假如你面临着一个 DSP 的问题，需要去查找教科书或者其他参考文献来寻求解决方案。那么你可能找到的是一页接一页的等式、难懂的数学符号和不熟悉的专

业术语。结果还是一头雾水，不知从何处入手。大多数 DSP 书籍甚至对于这个领域内有经验的人来说都是难以理解的。这当然并不是那些书本身有什么错误，而是它们是为那些非常专业的人士准备的。处于技术前沿领域的研究者需要这类详细的数学知识来理解这门科技的理论原理。

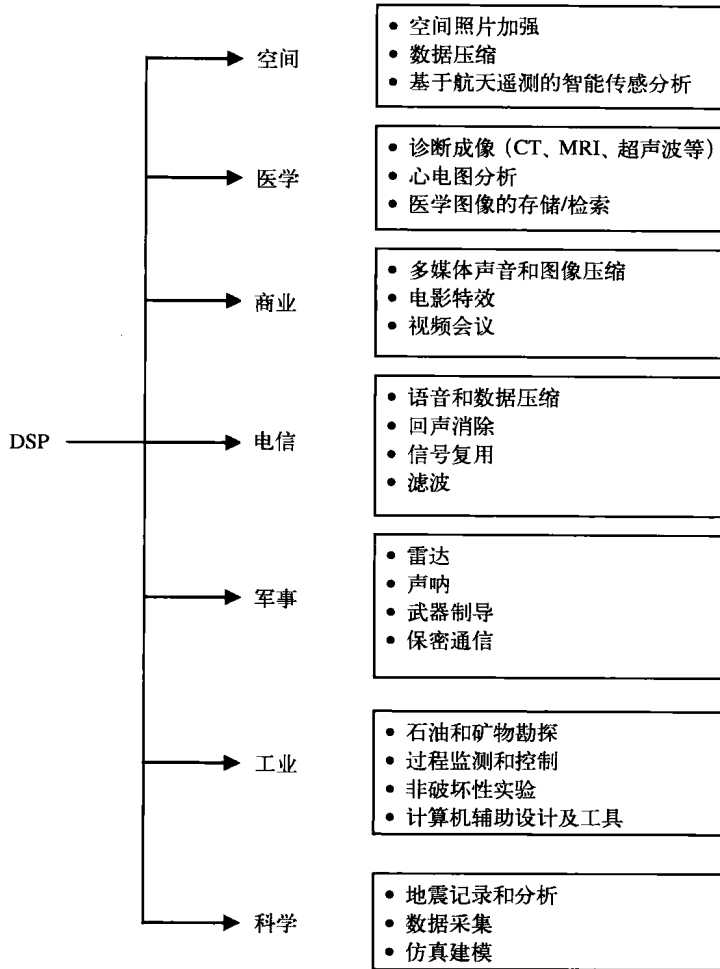


图 1-1 DSP 使科学和工程领域发生了革命性的变化。图中列出了一些不同的应用

本书的一个目标就是拆除以往的种种障碍，让那些没有扎实的数学知识和理论基础的读者，也能学习和使用大部分的实用 DSP 技术。本书是写给那些想把 DSP 作为一个工具而不是一个专业的人们的。

本章接下来将介绍那些由 DSP 引发变革的领域。在每一项应用中，你都会注意到 DSP 是一门不折不扣的跨学科技术，依赖于许多邻近领域的技术成果。如图 1-2 所示，DSP 与其他技术学科之间的界限并不十分明确，而是非常模糊并且有重叠的。如果你想精通 DSP，也需要学习这些相关领域的知识。

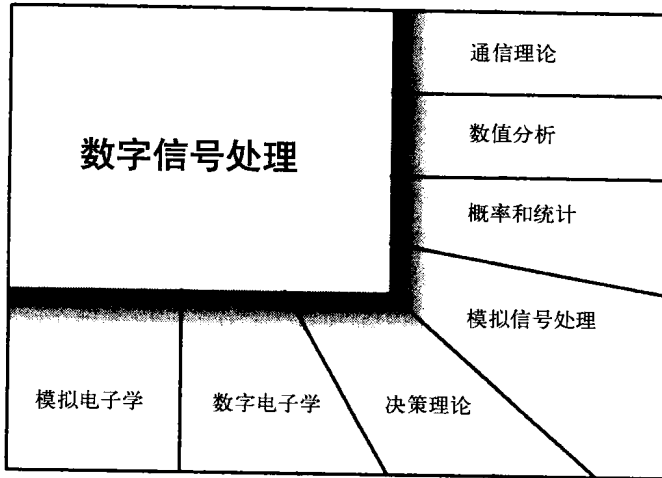


图 1-2 数字信号处理与科学、工程和数学等其他领域的界限模糊而重叠

1.2 电信

电信就是把信息从一个地点传递到另一个地点。这包括多种形式的信息：电话语音、电视信号、计算机文件以及其他类型的数据。为了传送数据，首先需要在两地之间建立一个信道，其具体形式可以是一对电缆线、无线信号、光纤等。电信公司通过传送客户的信息来获得收益，同时他们需要花钱来建立和维护信道。财务盈亏模式很简单：通过一个信道传送的信息越多，赚的钱就越多。DSP 导致电信工业在许多方面爆发了革命：信令音的产生和检测、通频带切换、滤波消除线路噪声等。下面将讨论电信网中 3 个具体的例子：复用、压缩和回声控制。

1.2.1 复用

全世界大概有 10 亿电话用户。交换网允许任何一个用户在几秒钟内连接到另一个用户，而需要用户进行的操作只是简单地按一下键盘按钮。这项工作所需的工作量之巨大令人惊奇！直到 20 世纪 60 年代，两部电话之间的连接还需要通过机械交换机和放大器来传递模拟语音信号。一个连接需要一对电缆线。相比而言，DSP 把音频信号转换成串行数据流。因为比特数据很容易交织在一起并在一定时间之后分开，所以许多话路就可以在同一信道上传输。举例来说，电话标准中的一个 T 载波系统可以同时传送 24 路语音信号。每路语音信号每秒被抽样 8 000 次，每个抽样点用 8 位编码（对数压缩）完成模拟到数字的转换。这导致每路语音信号速率达到 64 000 bit/s，全部 24 个话路的速率将达到 1.544 Mbit/s。这个信号可以使用传统的电话线路——22-标准铜缆传送 6 000 ft (1 ft=30.48 cm)，这是一个典型的连接距离。数字化传输的成本非常低，电线和模拟交换设备非常昂贵，而数字逻辑门则非常便宜。

1.2.2 压缩

当一路语音信号以 8 sample/s 的抽样率来数字化，那么大部分数字信息是冗余的。也就是说，每个抽样点携带的信息与相邻抽样点所携带的信息大部分是重复的。许多 DSP 算法可以把数字语音信号转换成比特率在 bit/s 量级的数据流，这就是数据压缩算法。相应地，解压缩算

法是用来按原始形式恢复信号的算法。压缩算法因压缩数据量和所形成的声音质量的不同而不同。通常来说,把数据速率从 64 kbit/s 压缩到 32 kbit/s 不会导致声音质量的下降。当压缩到 8 kbit/s 时,声音质量会受到明显的影响,但仍然可以在长距电话网络中使用。而最低可以压缩到 2 kbit/s,此时声音会严重失真,但是在一些特殊场合,比如军事和海底通信中仍能使用。

1.2.3 回声控制

回声是长距电话通信中存在的重要问题。当你对着电话讲话时,你的声音信号会传送到对方话机的听筒上,同时也有一部分信号会以回声的形式反射回来。如果通话距离在几百米范围之内,接收到回声的延迟时间只有几毫秒。人耳可以习惯这么短时间内的回声,所以听起来很正常。随着距离的增长,回声变得越来越明显并使人厌烦。在洲际间通信时这种时延可达到几百毫秒,这确实令人感到不舒服。数字信号处理技术通过测量返回的信号从而产生一个合适的抵消信号来抑制回声。同样的技术被用于在对讲机用户同时接听和讲话的情况下,消除音频反馈(啸叫)的干扰。同样,也可以通过数字化地产生抵消信号来削弱环境噪声。

1.3 音频处理

人类的两种主要感觉就是视觉和听觉,因此,许多 DSP 都是与图像和语音处理相关的。人们既听音乐又听语音。DSP 使这些领域发生了革命性的改变。

1.3.1 音乐

从音乐家的麦克风到高保真发烧友的扬声器,这中间的路径是非常长的。数字数据再现对于避免普通的模拟存储和操作造成的失真非常重要。这对于比较过卡带和 CD 盘音质的人来说应该是非常熟悉的。通常的情况下,一首音乐是在录音棚的多个音轨上录制的。在某些情况下,甚至会单独录制各个乐器的声音和歌手的声音。这为音效师创造最终的作品提供了很大的灵活性。这种把各个音轨组合起来形成最终作品的复杂过程叫做混音。DSP 可以在混音过程中提供一些重要的功能,包括滤波、信号增强和减弱、信号编辑等。

DSP 在音乐处理方面最有趣的应用之一是人工混响。如果各个音轨只是简单地组合在一起,那么产生的声音会很无力,特别是当乐器演奏者在户外表演的时候,这是因为听众会受音乐回声和混响的影响,而这种影响通常会在声音工作室中被减小。DSP 允许回声和混响在混音过程中被加入,从而模拟出理想的听觉环境。几百毫秒之后的回声会让人产生身处大教堂里的感觉,而 10 ms 到 20 ms 延迟的回声会让人感觉处于较合适的视听间。

1.3.2 语音产生

语音产生和识别常用于人机交互领域。不是用你的手和眼睛,而是用你的嘴巴和耳朵完成人机交互。当你的手和眼睛需要做其他事情时,比如开车、做手术或者(不幸的)向敌人开火时,这种人机交互会带来很多便利。计算机语音合成有两种方法:数字记录和声音模拟。在数字记录方法中,演讲者的语音通常是以压缩形式被数字化和存储的。在回放过程中,存储的数据会被解压并且转换为模拟信号。1 h 的语音记录只需要 3 MB 的存储空间,甚至连小型计算机系统的存储容量都能满足这个要求。这是当今数字语音产生的最通用的方法。

声音模拟更为复杂,它试图模仿人类发声的机制。人类声音场源自一个有着共鸣频率的声

学腔体,这些频率是由腔体的大小和形状决定的。声音是通过以下两种方式在声音场中产生的:浊音和摩擦音。在浊音系统中,声音震动使空气在声腔中产生接近周期性的脉冲。相比之下,摩擦音产生自狭窄压缩空间(比如在牙齿和嘴唇间)中噪音的气体扰动。声音场模拟是通过产生数字信号来形成这两种激励信号实现的。回声腔体的特性是通过把激励信号传进具有相同谐振频率的数字滤波器来模拟的。这个方法曾被用于DSP早期应用的成功案例之一——*Speak & Spell*,一种销售量很大的儿童电子学习机。

1.3.3 语音识别

人类语音自动识别比语音产生的难度要大很多。语音识别是人类大脑可以轻松实现但是数字计算机却困难重重的一个经典案例。数字计算机可以存储和调用大量数据,以惊人的速度进行数学计算,即使做重复的事情也不会厌烦,工作效率也不会降低;然而,当今的计算机在面对原始感官数据时表现得非常不理想。让一台计算机每个月给你发一封电子账单很容易。让同样一台计算机理解你的语言却是一项非常艰难的工作。

数字信号处理解决语音识别的问题分为两步:特征量提取和特征量匹配。输入音频信号的每个单词都被分离,之后通过分析来确定激励的类型和谐振频率。这些参数随后会用来与以前的单词相比较从而确定最接近的匹配。通常,这种系统被限定在几百个单词之内,只能接收在单词之间有不同暂停的演讲,而且必须针对每一个单独演讲者进行培训。虽然这对许多商业应用来说足够用了,但是和人类听觉的能力相比,这种限定则显得粗陋了。在这个领域还有许多工作要做,谁能够生产出成功的商业产品,谁就可以获得巨大的经济回报。

1.4 回声定位

获得远程目标信息的一种常用方法是向它发射波。例如,雷达的工作原理是发射脉冲无线电波并且检测接收到的由飞行器反射的回声信号。在声呐系统中,通过在水中传播的声波来检测潜艇和其他水下目标。地质学家早就通过爆破和监听地层深处岩石的回声来对地球进行探测了。虽然这些应用有一个共同的思路,但是每种应用都有自己独特的问题和需要。数字信号处理使这3个领域都产生了革命性的改变。

1.4.1 雷达

雷达(RADAR)是无线电探测和定位(RADio Detection And Ranging)的简称。在最简单的雷达系统中,一个无线电发射器会产生持续数微秒的无线电脉冲。这个脉冲被馈给到一个高度定向的天线,其输出的无线电波将以光速传播。经过电波传播路径的飞行器会将电波的一小部分能量反射给一个接收天线,这个天线位于发射天线附近。到目标物体的距离就是通过发送脉冲时和接收到反射脉冲信号时的时间延迟计算出来的。目标物体的方向更容易找到,当接收到反射信号时自然就会判断出起初发射天线的指向。

雷达系统的工作范围由两个参数决定:发射脉冲的能量和无线接收机的噪声等级。不幸的是,增大脉冲能量通常需要增加脉冲长度,但脉冲长度的增加会降低测量时间延迟的准确性和精确性。这就导致了两个重要性能之间的冲突:探测大范围内目标的能力和准确测量目标距离的能力。

DSP已经在涉及这个基本问题的3个方面对雷达进行了革新。首先,DSP可以压缩接收到的脉冲,从而在不缩小探测范围的情况下提供更好的测距能力。其次,DSP可以通过对接收信

号的滤波来降低噪声。最后, DSP 使对不同脉冲形状和长度的快速选择和产生成为可能。在众多功能中, 这项功能允许对脉冲进行优化以解决某一具体的探测问题。最引人注目的是, 上述大部分工作都可以在与无线频率相当的抽样率下完成, 这个速率可以达到几百兆赫兹! 在雷达系统中, DSP 被看做像高效算法一样的高速硬件设计。

1.4.2 声呐

声呐 (SONAR) 是声音导航和定位 (SOund NAVigation and Ranging) 的简称, 它分为两类: 主动的和被动的。在主动声呐系统中, 在 2 kHz 到 40 kHz 之间的声波脉冲被发射到水中, 而后探测和分析回声。主动声呐的应用包括水下物体探测和定位、导航、通信和海地测绘。最大的使用典型值范围为 10 km 到 100 km。相比之下, 被动声呐系统只是简单地倾听水下声音, 包括自然湍流、水底生物以及潜艇和水面舰艇发出的机械声响。由于被动声呐不发射能量, 因此它对隐蔽行动来说是理想的。即在对方探测不到你的情况下探测到对方。被动声呐最重要的应用是探测潜艇的军用探测系统。被动声呐通常使用比主动声呐低的频率, 因为低频率在水中传播时不易被吸收。探测范围可达几千千米。

DSP 使声呐系统在许多与雷达系统类似的领域发生了革命性的变化: 脉冲产生、脉冲压缩以及探测信号的滤波。从某种角度来说, 声呐系统比雷达系统简单, 因为它使用的无线电频率比较低。从另一种角度来看, 声呐系统又比雷达系统困难得多, 因为它所处的环境非常规不稳定。声呐系统通常使用一系列的发送和接收信道而不是单一的信道。通过合理地控制和混合这些信道的信号, 声呐系统可以使发射脉冲指向特定方向并且判断接收到回声的方向。为了处理这些多路信道, 声呐系统需要和雷达系统一样巨大的 DSP 计算能力。

1.4.3 反射地震学

早在 20 世纪 20 年代, 地理学家就发现地壳的结构可以通过声音来探测。勘探者制造爆破并且记录地表 10 km 以下边界层的回声。基于这些回声地震图, 专业人员通过肉眼观察即可将其转换成表面结构图。地震反射方法迅速成为探测石油和矿藏的主要方法, 并且沿用至今。

在理想情况下, 发射到地下的一个声音脉冲在它通过的每个边界层都产生单一的回声。不幸的是, 情况往往不是这么简单。返回地表的每一个回声必须通过所有其他位于它之上的边界层, 而且这些边界层也会产生回声。这将导致回声在边界层之间的反射, 从而导致在地表检测到回声的回声。这个二次回声使得检测到的信号非常复杂并且难以分析。数字信号处理自从 20 世纪 60 年代起, 就被广泛应用于从反射地震图中分离原始回声和二次回声。那么, 早期的地理学家是怎样在没有 DSP 的情况下工作的呢? 答案很简单: 他们只看简单区域, 因为那里的多路反射被最小化了。DSP 使得在一些特殊地点的石油勘测成为可能, 比如大洋深处。

1.5 图像处理

图像是一种比较特殊的信号。首先, 这种信号是对空间参数 (距离) 的测量, 而大多数信号是对时间参数的测量。其次, 它们包含大量的信息。比如, 存储 1 s 的电视视频信号需要 10 MB 的容量, 这比一个相同长度的语音信号的 1 000 倍还要多。最后, 最终质量的判断通常是人类主观的评价, 而不是一个客观的标准。这些特性使得图像处理成为 DSP 应用领域的一个独特分支。