

数字信号处理

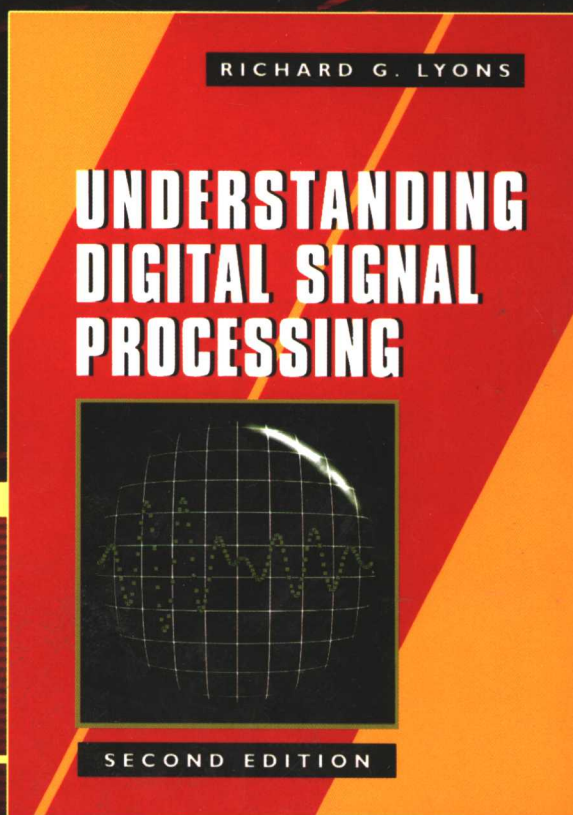
(原书第2版)

Understanding Digital Signal Processing

(Second Edition)

(美) Richard G. Lyons 著

朱光明 程建远 刘保童 等译
王万银 校



电子与电气工程丛书

数字信号处理

(原书第2版)

Understanding Digital Signal Processing

(Second Edition)

(美) Richard G. Lyons 著

朱光明 程建远 刘保童 等译
王万银 校



机械工业出版社
China Machine Press

本书一方面详尽地讨论了数字信号处理中的两大基本内容：离散傅里叶变换和数字滤波器，另一方面深入浅出地介绍了数字信号处理中深入发展的一些新课题。主要内容包括：周期采样、离散傅里叶变换（DFT）、快速傅里叶变换（FFT）、数字滤波器、离散希尔伯特（Hilbert）变换、采样速率转换、量化、信号取均值、无限冲激响应滤波器（IIR）、冲激频率采样和内插式有限冲激响应滤波器（FIR）、多相滤波器和串级积分器-梳状有限冲激响应滤波器（FIR）等内容。

本书适合作为电子工程专业、通信专业及其他相关专业的教材及教学参考书，也可供工程师以及专业技术人员参考。

Simplified Chinese edition copyright © 2005 by Pearson Education Asia Limited and China Machine Press.

Original English language title: *Understanding Digital Signal Processing, Second Edition* (ISBN 0-13-108989-7) by Richard G. Lyons, Copyright © 2004.

All rights reserved.

Published by arrangement with the original publisher, Pearson Education, Inc., publishing as Prentice Hall.

本书封面贴有Pearson Education（培生教育出版集团）激光防伪标签，无标签者不得销售。

版权所有，侵权必究。

本书法律顾问 北京市展达律师事务所

本书版权登记号：图字：01-2004-2308

图书在版编目（CIP）数据

数字信号处理（原书第2版）/（美）莱昂斯（Lyons, R. G.）著；朱光明等译.
—北京：机械工业出版社，2006.1

（电子与电气工程丛书）

书名原文：Understanding Digital Signal Processing, Second Edition

ISBN 7-111-17323-6

I. 数… II. ① 莱… ② 朱… III. 数字信号—信号处理 IV. TN911.72

中国版本图书馆CIP数据核字（2005）第102234号

机械工业出版社（北京市西城区百万庄大街22号 邮政编码 100037）

责任编辑：傅志红 刘亚伟

北京慧美印刷有限公司印刷·新华书店北京发行所发行

2006年1月第1版第1次印刷

787mm×1092mm 1/16·29印张

印数：0 001-4 000册

定价：55.00元

凡购本书，如有倒页、脱页、缺页，由本社发行部调换
本社购书热线（010）68326294

译者序

莱昂斯 (Lyons, R.G.) 编写的教材《Understanding Digital Signal Processing》(数字信号处理), 自1997年出版以来, 深受读者欢迎, 十分畅销。2003年, 我国国外高校电子信息类优秀教材 (英文影印版) 丛书编委会将本书作为国外优秀教材加以引进, 由科学出版社影印出版并迅速引起了国内相关读者的强烈反响。2004年, 作者在对第1版的内容进行修订和扩充后推出第2版。为了更快地使更多的读者从本书受益, 机械工业出版社决定将第2版译成中文, 以飨国内读者。我们有幸受出版社委托, 承担了该书的翻译任务。

本书既对数字信号处理的基本内容进行了系统阐述, 又介绍了目前数字信号处理的一些最新技术成果, 是一本理论和实践结合得十分恰当的教材。本书一方面详尽地讨论了数字信号处理中的两大基本内容——离散傅里叶变换和数字滤波器, 另一方面又深入浅出地介绍了数字信号处理中深入发展的一些新课题。例如, 数字通信中的正交信号、采样率变换、频率采样滤波器、希尔伯特变换和某些数字信号处理技巧等。全书以数字信号处理中由于离散化和有限长度数据引起的各种问题为主线, 让读者看到这些问题的来龙去脉, 并一步一步地引导读者找到解决这些问题的方法。在进入数字信号处理的科学大殿的征程中, 帮助读者跨过DSP的一道道门槛, 每进一道门都会使读者感到豁然开朗, 别有洞天。全书内容简洁明快且系统全面, 文字逻辑性强且诙谐幽默, 图片精致细腻。本书对于从事数字信号处理、数字通信技术等研究领域的科技工作者而言, 是一本易于入门而又能够迅速掌握该领域新技术进展的良好教材。

参加本书翻译的有朱光明 (前言和第1、10、11章)、程建远 (第7、8、9章)、刘保童 (第5、6章)、黄翼坚 (第12、13章)、赵淑红 (第3、4章)、马德堂 (附录A、B、C、D、E、F、G) 和李桂花 (第2章、附录H和索引)。黄翼坚对各章做了初步编辑, 同时做了翻译过程中大量的联络工作。全书由朱光明统稿, 王万银审校。

本书能够得以出版, 首先要感谢机械工业出版社的支持和信赖。在全书的翻译过程中, 由于我们专业知识的不足, 实际经验的欠缺, 以及英文水平有限等, 加上时间较仓促, 难免有词不达意之处, 甚至有错误的地方, 敬请读者批评指正。

前言

本书是1997年出版的教材《数字信号处理》的修订版。同第1版一样，本书的目的是帮助初学者理解数字信号处理（DSP）的新技术。除第1版内容之外，第2版还包括下列内容：

- 补充说明第1版中谱分析和数字滤波的内容，使其对DSP初学者更有价值。
- 扩展了正交（复数I/Q）信号的范围。在很多例子中，我们使用三维时间和频率曲线来描述这些二维信号，并给出其物理意义。
- 为了更突出正交信号，增加了希尔伯特变换以及如何用希尔伯特变换在实际中生成正交信号的内容。
- 讨论了频率域采样、插值FIR滤波器和CIC滤波器，比以前的DSP教科书更多地揭示出这些重要滤波器的性质。
- 扩展了常用的“数字信号处理技巧”这一章。
- 修订了名词术语，以更好地描述现今的DSP技术。

前言写到这里，作者通常应该告诉读者为什么应该学习DSP，但我不需要这样做，因为DSP在现代工程领域中的重要性已经非常突出。这里我只想说电子学的未来是DSP，有了这本书，你就可以逐步地掌握最先进的DSP专业知识。

学习数字信号处理

在学习数字信号处理原理以及用语言描述它时，并不要求有熟练的分析技巧或雄厚的数学背景，而只需要一些初等代数的基本知识、正弦波的知识，以及高涨的学习热情。这或许令人难以置信，特别是在翻阅到本书那些看起来相当复杂的图形和公式之后，你会说，这里的内容看起来似乎让人头痛，这不又是一本难以理解的数字信号处理教科书吗？其实不然。

本书的目的是循序渐进地、清楚地对教学内容加以说明和解释，使你更好地理解它们。你还能回忆起第一次见到别人下棋的情形吗？这种游戏当时看起来奇妙无比、难以捉摸，但现在你已经知道，每一步棋的移动并不复杂，只要稍微耐心一点，各种规则都很容易学会。下棋的复杂性来自各步棋的组合以及什么时间走哪一步。数字信号处理也是如此。首先我们学习基本规则和过程，然后再综合应用它们。

你还会问，如果学习数字信号处理如此容易，那么这一课程为什么会因难以理解而闻名呢？一部分原因在于文献中关于这些题材的经典的表示方法。精细的数学形式有时是难以传达技术信息的。写方程是一回事，从实际的观点解释这些方程的意义又是另一回事，而后者正是本书的目标。

通常，数字信号处理理论有两种说明形式：一种是简练的数学方式，读者只得到一个短的、简便的方程，而没有进一步的解释；另一种是囫圇吞枣地塞给读者含有大量复杂变量的方程和诸如“这是显然的”、“在相同条件适用”等片语，这些方程到底说明了什么问题，读者很难明白，他们必须像矿工一样，拿起挖矿的锄头和铲子，戴上头盔，试图从数学表达式的矿山中挖掘出信息（本书给出了几个有成效的开采成果）。你必定曾经多次地追踪过某些方程式的推导过程，在推导之后作者说，他要用一个例子来说明这个方程——但这个例子又是另一个方程！

虽然用数学描述数字信号处理是必要的，但我尽力避免因繁琐的数学符号而阻碍读者的学习，因为过多地用方程描述技术会使初学者难以消化。

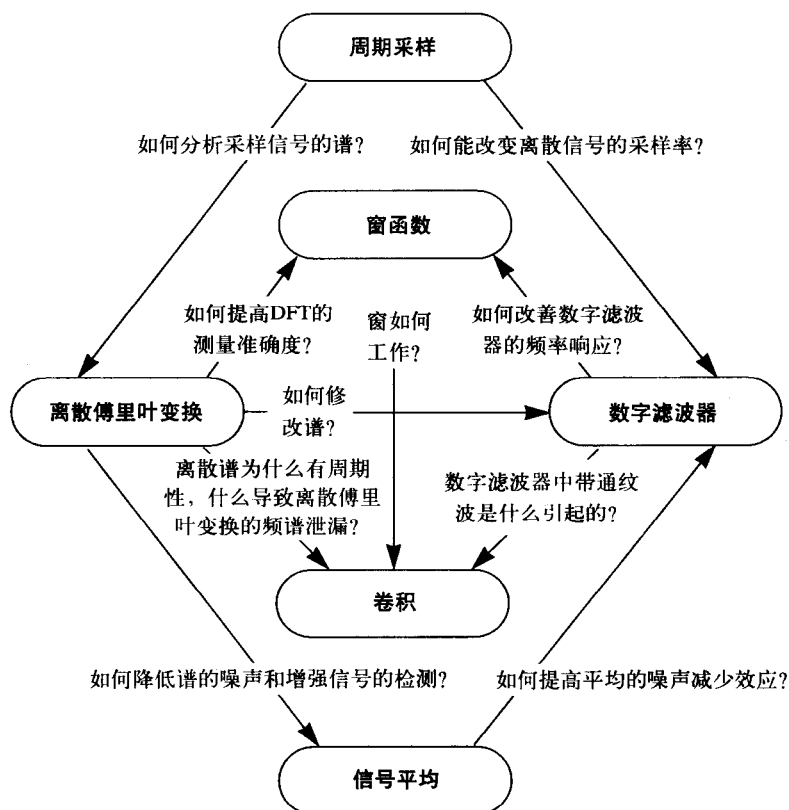
本书的内容用通俗的方式表示，正如E. B. White在他的《Elements of Style》(Macmillan出版公司，纽约，1959)的导论中所说：

“读者很多时候都感到很困惑，好像一个人陷到泥潭中，任何一个作者写作的责任就是很快地排开这些泥潭中的水，将陷到泥潭中的人拉到干燥的地面上，或者至少应该扔给他一根绳子”。

我试图避开传统的说教方式，而想使读者在读这本书时就好像朋友在公园里散步谈话一样，所以我只用必要的数学来表达基本理论，然后就用实例来说明这些理论。

学习指导

学习数字信号处理不是要完成某件事，它是你经历的一个过程。当你加深了对某些题目的理解时，你又会会对研究数字信号处理的某些其他方面的问题感兴趣^①。你希望借助于更多的知识进一步揭示诸如下面图中数字信号处理的其他方面内容。本书只是你学习过程第一阶段的一个指南。



① “你明白，我正是以这种方法进行探索研究的。这是我所听到的唯一的研究方法。我提出一个问题，找到一些方法解决问题，但又出现一个新的问题。可能是这个，或者可能是那个吗？你不能想像这对于一个研究人员意味着什么，是什么激发出一个知识分子的热情。你也不可能想像出这些知识分子追求的竟是这种平淡无奇的欢乐。” (Dr. Moreau—H. G. Wells的*Island of Dr. Moreau*中著名的外科医生和动物解剖学家，1896)

学习本书的内容，不一定要有一台计算机，但是如果有，肯定会有帮助。DSP模拟软件使初学者能够通过多次测试，反复处理，验证信号数字处理理论^①。特别是那些能画出信号数据曲线、进行快速傅里叶变换和分析数字滤波器的软件会是非常有用的。

当你读本书时，如果你理解较慢，不要灰心。正如希腊数学家Menaechmus在Alexander请教他一个数学问题时所说的，“学习数学没有平坦的大路”。Menaechmus确信地告诉Alexander，学习数学的唯一办法是仔细研究。这同样适用于数字信号处理。还有，如果某些内容你需要读好几次，也不要气馁。虽然本书的概念不像量子物理学那样复杂，不像Louie Louie的歌词那样奇妙，但它们也有一点儿复杂性（难以理解），值得你注意和思考。所以，如果需要，你就慢一点儿，将这些内容读两遍，这样做你会得到乐趣。如果你坚持下去，引用Susan B. Anthony的一句名言：“失败是不可能的”。

引人入胜的各章节内容

第1章首先给出全书所用的符号，接着引入离散信号序列的概念，说明它们与连续信号的关系，以及如何在时域和频域描述这些序列。除此之外，第1章还定义了数字信号处理系统框图中的运算符号。最后简要地介绍了线性系统的思想，并说明为什么线性系统使我们在分析中可以使用许多强有力的数学工具。

第2章介绍在数字信号处理和周期性采样过程中常常误解的问题。虽然掌握对连续信号采样这一概念是直接简单的，但其中有许多数学的微妙技巧需要仔细地思考。该章从简单的低通采样的例子开始，进而讨论带通采样的一些有意义的课题，并定量阐明与这些题目有关的频域中的二义性（假频）。

第3章重点讨论数字信号处理的主要课题之一——用于谱分析的离散傅里叶变换（DFT）。首先用详细的例子说明DFT的重要性以及如何理解DFT谱的结果，再进一步讨论用于减少DFT频谱泄漏的窗函数以及由DFT引起的处理增益。最后，作为该章的结论，详细讨论初学者在文献中常遇到的矩形函数的各种变换形式，包括阐明实数和复数正弦信号的DFT。

第4章介绍在数字信号处理领域产生深远影响的发明——快速傅里叶变换（FFT）。这里阐明普遍采用的以2为基的FFT与DFT之间的关系，定量地讨论利用FFT进行数字信号处理所带来的优点，说明为什么FFT有这样的功能，并给出FFT不同的实现结构。该章还给出了一个帮助读者在实践中使用FFT的推荐列表。

第5章引入数字滤波的课题，并且从简单的低通有限冲激响应（FIR）的例子开始，仔细地分析滤波器的频域幅度响应和相位响应。然后，我们学习窗函数怎样影响FIR滤波器以及窗函数怎样用于滤波器设计。我们还提出了将低通FIR滤波器设计转换为带通滤波器和高通滤波器的方法，用例子介绍和说明普遍应用的列梅兹（Remez）交换（Parks McClellan）FIR滤波器的设计技术。在该章，我们使读者熟悉卷积的过程。在介绍了几个简单的卷积例子之后，我们以强有力的卷积定理的讨论来说明卷积定理为什么对理解数字信号处理如此有用。

第6章讨论第二类数字滤波器，即无限冲激响应（IIR）滤波器。在讨论几种设计IIR滤波器的方法时，向读者介绍被称为 z 变换的很有用的数字信号处理的工具。因为 z 变换与连续拉普拉斯变换的关系非常紧密，所以该章一开始就逐步说明拉普拉斯变换的来源、性质以及在学习 z 变换中的应用。我们将说明IIR滤波器是如何设计和实现的，为什么它们的性能与FIR滤波器

① “人们必须通过做事来学习，虽然你想像你懂了，但是你不能肯定你已经懂了，你只有试着做了以后才能真正掌握它。”（Sophocles, 496-406 B.C.）

是如此的不同。为了指明在什么条件下应该用这类滤波器，本章定量地比较FIR和IIR滤波器两者之间的关键性质。

第7章介绍两种特殊的、在传统DSP教科书中没有说明其特性的数字滤波器，即所谓的频率采样滤波器和插值FIR滤波器。这些滤波器增强了低通滤波器的计算效率，是我们滤波器设计技术中的锐利武器。虽然这些滤波器也是FIR滤波器，但推迟到该章介绍是因为在第6章中熟悉 z 变换后这些滤波器的性质更容易理解。

第8章给出正交信号（也称为复信号）的详细描述。近年来正交信号理论在信号分析和数字通信实现方面变得非常重要，因此单列一章讨论是完全值得的。我们利用三维图形来说明该章给出的正交信号所使用的数学符号的物理意义及处理优点，特别强调了正交信号的采样（也称为复下变频）。

第9章给出关于希尔伯特变换在数学上渐进的、但技术上完整的描述——它是用来由实信号生成正交信号（复信号）的过程。该章中还描述了希尔伯特变换的性质、特点和实际设计方法。

第10章简要介绍非常奇妙和非常有用的采样率转换过程（通过抽取和插值改变离散数据序列的有效采样率）。采样率转换在改善许多数字信号处理运算的性能和复杂性方面非常有用，但采样率转换实质上是一个低通滤波器设计问题。因此，该章还介绍了多相和级联综合梳状滤波器。

第11章讨论信号平均这一重要题目。在该章我们要了解平均是如何通过减少测量的噪声背景来增加信号测量的精度的。这种精度的提高称为处理增益，该章将说明如何在时域和频域预测通过平均信号得到的处理增益。除此之外，还用例子解释和说明了相干平均和不相干平均的关键差别。最后比较详细地介绍了常用的指数平均的技术。

第12章讨论读者在数字信号处理中常遇到的各种二进制数据格式问题。我们建立了这些数据格式表示的精度和动态范围与使用这些数据格式的内在陷阱之间的联系。关键的是二进制数的字长（二进制位数），它自然地使我们要讨论模数转换器（A/D）数值分辨率的局限性，以及对于一个给定的应用问题如何确定最佳的A/D转换器的字长。该章还讨论了数据溢出和舍入误差问题，从统计观点介绍两种最流行的对于溢出、截断和舍入的补救方法。最后介绍了浮点二进制格式，这种格式能克服定点二进制格式引起的大部分限制，特别是在减少数据溢出的不良影响方面。

第13章给出了用于使数字信号处理算法更有效的一个方法策略集。这些方法策略编排在本书最后一章有两个原因：第一，把这些方法策略集中到一章，使我们将来很方便地知道到什么地方去找它们；第二，许多方法都要求理解前面各章的内容，所以最后一章作为我们的方法策略库是合适的。这些技术的详细验证以及很多重要思想的反复说明都在前面的章节中。

附录包括有助于初学者理解数字信号处理性质和数学工具的内容。附录A是复数算法的综合描述；附录B推导了常用但很少说明的几何级数的闭式解；附录C说明离散系统时间反转（零相位数字滤波器）的两种形式和精妙性；附录D介绍和说明平均值、方差和标准差的统计概念；附录E讨论为改善频谱表示的幅度分辨率而使用的对数分贝刻度的来源和使用方法；附录F用稍微不同的体系给出了数字滤波器领域所用的术语。

致谢

这一版中的很多新材料都是从USENET新闻组comp.dsp的聪明的高手那里学来的（我可以列出很多人的名字，但是如果这样做，将会挂一漏万），所以只能对comp.dsp上教给我这么多

数字信号处理理论的DSP伙伴们说声谢谢。

修改早期版本手稿的任务特别麻烦，需要很大的耐心，我很幸运得到有才干的Eric Jacobsen、Peter Kootsookos博士、Matthew Donadio、Ian Buckner博士、Mike Rosing博士、Jerry Olup、Clay S. Turner、Ray Andraka、Jim Thomas、Robert Bristow-Johnson、Julius Kusuma和Ing. Rune Allnor博士的帮助。谢谢他们！

我还要感谢Patty Donovan，是她将堆在她书桌上乱七八糟的手稿转变成一本可读的书；感谢Prentice的出版人Gurus Lisa Iarkowski和Anne Garcia帮助解决了出版过程中的许多事务；感谢编辑Bernard Goodwin[⊖]对我的鼓励和指导。

我真诚地希望读者从本书中受益。如果你有什么意见或对有关材料有什么建议或者发现什么错误，不管多么琐碎和无关轻重，请告诉我，地址是r.lyons@ieee.org，我保证回复。

⊖ “出版者按他的感觉生活，作家们也是这样，但是作家们是一群沿着各自的隧道独自挖掘的鼹鼠；因此出版者像Hamelin的吹笛手Pied Piper那样，用他们的笛声将这些鼹鼠引到他所希望他们走的路上。”（Lovat Dickson）

目 录

译者序

前言

第1章 离散序列和系统1

1.1 离散序列及其表示法1

1.2 信号的振幅、幅度和功率5

1.3 信号处理的运算符号6

1.4 离散线性时不变系统概述7

1.5 离散线性系统7

1.6 时不变系统11

1.7 线性时不变系统的可交换性12

1.8 分析线性时不变系统12

参考文献12

第2章 周期采样15

2.1 假频: 频域中信号的二义性15

2.2 低通信号的采样18

2.3 带通信号的采样21

2.4 带通采样中谱的倒置27

参考文献30

第3章 离散傅里叶变换31

3.1 理解DFT方程式31

3.2 DFT的对称性41

3.3 DFT的线性性质42

3.4 DFT的幅度42

3.5 DFT的频率轴43

3.6 DFT时移定理44

3.7 DFT求逆45

3.8 DFT泄漏46

3.9 窗52

3.10 DFT花边损失56

3.11 DFT分辨率、补零和频域采样57

3.12 DFT处理增益60

3.13 矩形函数的DFT63

3.14 复数输入的DFT频率响应77

3.15 实数余弦函数输入的DFT频率响应79

3.16 实数余弦函数输入的DFT单个频率

单元的频率响应81

3.17 解释DFT81

参考文献84

第4章 快速傅里叶变换87

4.1 FFT与DFT的关系87

4.2 实际使用FFT的一些问题88

4.3 FFT软件程序90

4.4 基2-FFT算法的推导91

4.5 FFT输入/输出数据索引中二进制的

倒置96

4.6 基2-FFT蝶形算法结构97

参考文献102

第5章 有限冲激响应滤波器105

5.1 有限冲激响应滤波器概述106

5.2 FIR滤波器中的卷积108

5.3 低通FIR滤波器设计116

5.4 带通FIR滤波器设计126

5.5 高通FIR滤波器设计127

5.6 列梅兹交换FIR滤波器设计方法128

5.7 半带FIR滤波器130

5.8 FIR滤波器的相位响应131

5.9 离散卷积的一般描述134

参考文献142

第6章 无限冲激响应滤波器145

6.1 无限冲激响应滤波器概述146

6.2 拉普拉斯变换147

6.3 z 变换156

6.4 IIR滤波器设计的冲激响应不变法165

6.5 IIR滤波器设计的双线性变换法176

6.6 IIR滤波器设计的最佳化方法183

6.7 IIR滤波器实现中的陷阱184

6.8 用级联结构改进IIR滤波器185

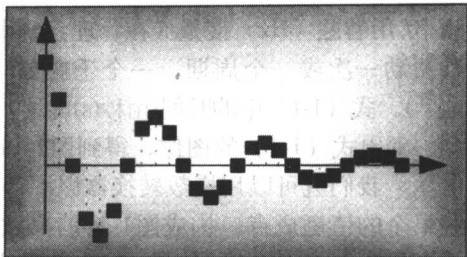
6.9 IIR滤波器和FIR滤波器的简要比较188

参考文献	189	12.2 二进制数的精度和动态范围	303
第7章 专用的低通FIR滤波器	193	12.3 定点二进制有限字长的影响	303
7.1 频率采样滤波器——被遗忘的技巧	193	12.4 浮点二进制格式	314
7.2 插值低通FIR滤波器	216	12.5 块浮点二进制格式	317
参考文献	225	参考文献	318
第8章 正交信号	227	第13章 数字信号处理技巧	321
8.1 为什么要用正交信号	227	13.1 无乘法的频率变换	321
8.2 复数的表示	227	13.2 向量幅度的快速估算	327
8.3 利用复相量表示实信号	231	13.3 频域加窗	329
8.4 关于负频率的几点讨论	234	13.4 复数的快速乘法	331
8.5 频域中的正交信号	234	13.5 实序列FFT的高效算法	332
8.6 频域中的带通正交信号	236	13.6 用正FFT计算逆FFT	340
8.7 复下变频	237	13.7 简化的FIR滤波器结构	342
8.8 复下变频的实例	239	13.8 减小A/D转换器的量化噪声	343
8.9 另一种下变频方法	242	13.9 A/D转换器测试技术	346
参考文献	243	13.10 使用FFT进行快速FIR滤波	349
第9章 离散希尔伯特变换	245	13.11 正态分布随机数据的产生	350
9.1 希尔伯特变换的定义	245	13.12 零相位滤波	351
9.2 为什么重视希尔伯特变换	247	13.13 锐化的FIR滤波器	352
9.3 希尔伯特变换的冲激响应	250	13.14 带通信号插值	353
9.4 设计一个希尔伯特变换	252	13.15 频谱峰值位置算法	354
9.5 时域解析信号的生成	256	13.16 FFT旋转因子的计算	356
9.6 解析信号产生方法的比较	257	13.17 单一音频的检测	358
参考文献	257	13.18 滑动DFT	361
第10章 采样率转换	259	13.19 频谱细化的FFT	366
10.1 抽取	259	13.20 一种实用的谱分析器	368
10.2 插值	263	13.21 一个有效的反正切估计算法	370
10.3 抽取和插值的综合	264	13.22 频率解调算法	372
10.4 多相滤波器	265	13.23 消除直流成分	373
10.5 级联的积分器梳状滤波器	269	13.24 传统CIC滤波器的改进	376
参考文献	277	13.25 平滑冲激噪声	379
第11章 信号平均	279	13.26 有效的多项式估计	380
11.1 相干平均	280	13.27 高阶FIR滤波器的设计	381
11.2 不相干平均	283	13.28 使用FFT进行时域插值	383
11.3 多个快速傅里叶变换的平均	286	13.29 用抽取进行频率变换	384
11.4 时域平均的滤波问题	292	13.30 自动增益控制	385
11.5 指数平均	292	13.31 近似包络检波	387
参考文献	297	13.32 正交振荡器	388
第12章 数字数据格式及其影响	299	13.33 双模式平均	390
12.1 定点二进制格式	299	参考文献	390

附录A 复数的运算	395	附录F 数字滤波器的术语	417
附录B 几何级数的闭式	401	附录G 频率采样滤波器一些方程的 推导	425
附录C 时间反序和离散傅里叶变换	403	附录H 频率采样滤波器设计参数表	433
附录D 均值、方差和标准差	405	索引	443
附录E 分贝 (dB和dBm)	411		

第1章

离散序列和系统



数字信号处理从来没有像现在这样流行和易于操作。不久之前,FFT(快速傅里叶变换,我们将在第4章中详细讨论)只是工业研究中心和大学所用的一种奇妙的数学过程,而现在,令人惊叹的是,FFT已经成为我们大家都可以得到的技术,甚至已经成为家用计算机廉价软件中提供的一种固有函数。现有的更完善的商业性信号处理软件使我们能快速、可靠地分析和开发复杂的信号处理应用程序。我们可以进行谱分析,设计数字滤波器,开发语音识别系统,进行数字通信以及在定义的算法和计算结果的图形显示之间利用软件交互地做图像压缩处理等。自从20世纪80年代中期以来,与买得起的家用计算机相同的集成电路技术,已经制造出强有力的廉价的硬件开发系统来实现我们的数字信号处理设计^①。虽然,这些新的数字信号处理开发系统和软件应用起来更加便利,但我们仍然需要有一个坚实的基础来理解数字信号处理的基本原理,本书的目的就是奠定这个基础。

第1章作为学习全书其余部分研究题目的开头,我们首先定义数字信号处理的名词术语,说明用图形表示离散信号的各种方法,建立描述数字信号的数值序列所用的记号,给出用以描述信号处理运算的符号,并简要介绍线性离散系统的概念。

1

1.1 离散序列及其表示法

通常,信号处理指的是分析随时间变化的物理过程的科学。就这一点而论,信号处理可分成两类,即模拟信号处理和数字信号处理。模拟用于描述振幅随时间连续变化并且振幅在某个范围内可以连续取值的波形。加到示波器上的某种电压就是模拟信号的一个例子,它在示波器上显示为一个随时间变化的连续函数。模拟信号也可以加到通常的谱分析器上,以确定信号的频率成分。模拟这个术语的出现根源于1980年以前所用的模拟计算机,这些计算机通过用老式电话运算器插卡与物理的(电子的)差分器和积分器连接在一起来解线性差分方程。在使用这种方法的实际电路中,连续的电压或电流模拟不同方程中的一些变量,如速度、温度、气压等等。(当今,随着数字计算机运算速度越来越快和使用越来越方便,模拟计算机已经被淘汰,但是模拟计算机存在期间对其部件的良好描述在参考文献[1]中仍然可以找到)。由于目前连续的无线电类信号处理所利用的电阻、电容、运算放大器等,实际上并没有模拟的内容,所以模拟这个概念实际上是不规范的。目前,通常所说的模拟信号处理,更正确的术语应是连续信号处理。因此,本书中我们尽量少用模拟信号这个术语,每当合适的时候,都用连续信号代替。

术语离散时间信号用于描述其独立时间变量被量化的信号,因此我们只知道信号在离散时刻瞬间的值。这种离散时间信号并不是一个连续的波形,而是一个值的序列。除了时间变量是量化的之外,离散时间信号的振幅值也是量化的。我们可以用一个例子来说明这一概念,想像一个振幅的峰值为1,频率为 f_0 的连续正弦波

$$x(t) = \sin(2\pi f_0 t) \quad (1-1)$$

① 早在20世纪90年代电视访谈节目中,一个领头的计算机科学家曾说,如果汽车技术像现在计算机工业一样取得进展,那么,我们人人都可有一辆每小时跑50万英里、只耗费1加仑汽油的汽车,汽车的成本是如此之低,以至于把它扔掉比在旧金山付一天停车费更便宜。

频率 f 用赫兹(Hz)度量(在物理系统中,我们通常测量的频率以赫兹为单位,一个赫兹,是每秒振动一次或一个周期。一个千赫兹(kHz)是一千赫兹,一个兆赫兹(MHz)是一百万赫兹^①)。式(1-1)中的时间 t 用秒(s)度量,因子 $f_0 t$ 具有周期的量纲, $2\pi f_0 t$ 是用弧度(rad)度量的角度。

画出式(1-1)的图像,得到图1-1a所示的连续的正弦曲线。如果连续的正弦波代表实际的电压,我们就可以用模数转换器以 t_s 秒的间隔采样,将正弦波表示为一个离散值的序列。将这些单个的值画成点,构成图1-1b的离散波形。我们称图1-1b是图1-1a中的连续信号的“离散时间”形式。式(1-1)和图1-1a中的独立变量 t 是连续的,图1-1b中的独立指标变量 n 是离散的,因而,只能取整数值。也就是说,指标 n 用来标记图1-1b中离散序列的各个元素的序号。

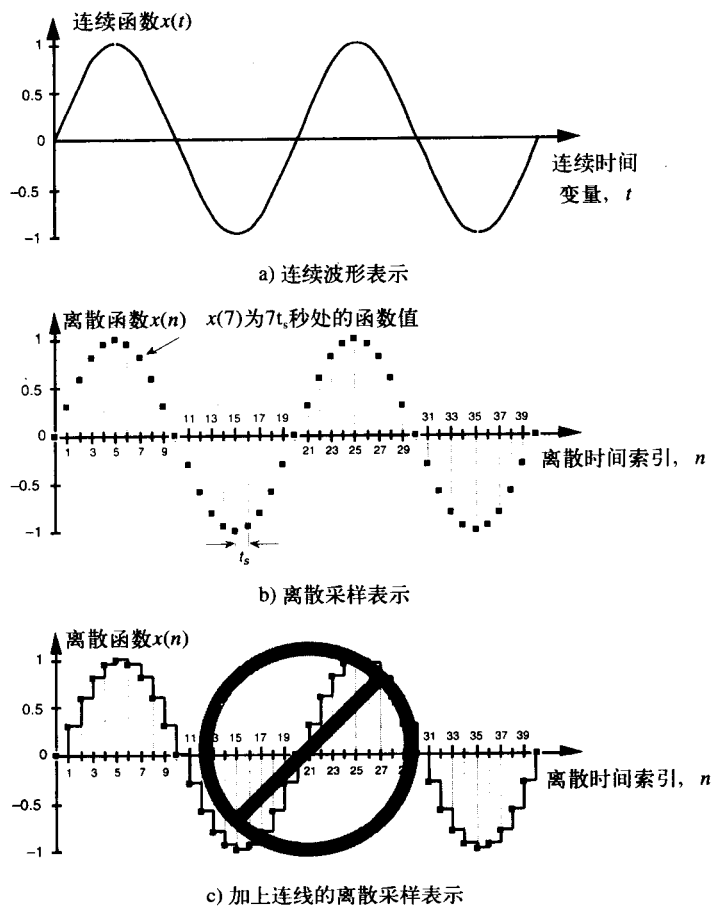


图1-1 一个时域表示的正弦波

不要试图在图1-1b的离散序列的点之间画上连线。因为某些原因,有些人(特别是对于连续信号有丰富经验的那些工程师)希望用直线或者阶梯状的线将这些点连接起来(如图1-1c所示)。将离散点之间连上连线可能会使初学者产生误解,使他们忘记 $x(n)$ 序列只是一列数,除此之外没有别的。记住, $x(n)$ 是由许多单个值组成的一个离散时间序列,在这个序列中,每一

① 频率的量纲是周期/秒;这就是为什么老式无线电调谐刻度盘的指示频率为千周/秒(kcps)或兆周/秒(Mcps)的缘故。1960年科学协会采用尊敬的德国科学家的名字Heinrich Hertz赫兹作为频率单位,他在1887年第一次证明了无线电波的发射和接收。

个值画成一个点。我们不考虑 $x(n)$ 的点之间的联系, 这些点之间什么联系也没有。为了强调离散时间序列的概念, 我们可以列出图1-1b中的那些采样值如下:

$$\begin{aligned} x(0) &= 0 \quad (\text{第1个序列值, 指标} n=0) \\ x(1) &= 0.31 \quad (\text{第2个序列值, 指标} n=1) \\ x(2) &= 0.59 \quad (\text{第3个序列值, 指标} n=2) \\ x(3) &= 0.81 \quad (\text{第4个序列值, 指标} n=3) \\ &\vdots \end{aligned} \quad (1-2)$$

其中 n 是整数序列的时间指标, 取值0, 1, 2, 3等, t_s 是取某个常数值的采样时间周期。这些采样值可用离散时间表达式写成

$$x(n) = \sin(2\pi f_0 n t_s) \quad (1-3)$$

(这里, $2\pi f_0 n t_s$ 仍是用rad度量的角度)。注意, 式(1-2)中的指标 n 从0开始, 而不是从1开始。并不是必须这样做, n 的第1个值也可以是1, 但我们习惯上从0开始, 这样我们就可以从时刻0开始描述正弦波。式(1-3)中的变量 $x(n)$ 读作“序列 $x(n)$ ”。式(1-1)和(1-3)式表示的信号也称为时域信号, 因为式(1-1)中的独立变量连续时间 t 和式(1-3)中的独立变量离散时间 nt_s 都是以时间为单位的。

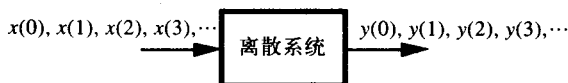
有了离散时间的概念, 我们可以说一个离散系统是用来对离散信号进行运算的一些硬件部件或软件程序的集合。例如, 一个离散时间系统可以是这样一个过程, 当在图1-2a的系统中输入一个离散序列 $x(0), x(1), x(2), \dots$ 时, 系统将产生一个离散输出序列 $y(0), y(1), y(2), \dots$ 还有, 为了使系统这个概念更精确更简明, 以及保持输入和输出序列仍然是单个的元素, 图1-2b中用了个更简单的符号。图中 n 表示整数序列0, 1, 2, 3等, $x(n)$ 和 $y(n)$ 是表示两个不同的序列的变量。这样, 图1-2b使我们能用更简单的表达式, 如

$$y(n) = 2x(n) - 1 \quad (1-4)$$

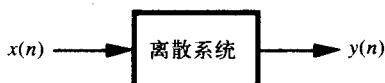
来描述一个系统的输出。为了说明式(1-4), 设 $x(n)$ 是5个元素的序列, $x(0)=1, x(1)=3, x(2)=5, x(3)=7$ 和 $x(4)=9$, 则 $y(n)$ 也是5个元素的序列, 其值为 $y(0)=1, y(1)=5, y(2)=9, y(3)=13$ 和 $y(4)=17$ 。

连续系统和离散系统中的时间变量的表示方法有根本的差别, 这也给连续系统和离散系统的频率特征的表示带来极大的差别。为了说明这一点, 让我们重新考虑图1-1a中的连续的正弦波。假设它表示某一电缆端点的电压, 那么我们可以把它加到一个示波器或一个频谱分析器或一个频率计数器上来测定它的频率。但这里有一个问题, 如果只给出由式(1-2)得到的数据表, 由此如何确定出这些数据所表示的波形的频率呢? 我们把这些离散值画成图, 当然, 我们可以认出如图1-1b所示的一个正弦波。我们可以说这个正弦波每隔20个样值重复一次, 但只从这些离散值无法确切地知道正弦波的频率。你或许明白我们这里提出这点的意义, 如果再知道相邻采样值之间的时间——采样周期 t_s ——我们就能确定离散正弦波的绝对频率。譬如说, 设采样周期为 t_s 是0.05ms/采样值, 则正弦波的周期是

$$\text{正弦波周期} = \frac{20 \text{ 个采样值}}{\text{每周期}} \cdot \frac{0.05 \text{ ms}}{\text{采样值}} = 1 \text{ ms} \quad (1-5)$$



a) 输入和输出都是单个值的序列



b) 用缩写的符号 $x(n)$ 和 $y(n)$ 表示的输入和输出

图1-2 给离散系统一个输入, 系统将有一个输出

因为正弦波频率是其周期的倒数，所以我们现在知道正弦波的绝对频率是 $1/(1\text{ms})$ 或 1kHz 。另外，如果采样周期是 2ms ，则图1-1b中的离散采样表示周期为 40ms 或频率是 25Hz 的正弦波。这里所说的就是，在离散系统中，绝对频率(Hz)的确定依赖于采样频率 $f_s = 1/t_s$ 。阅读本书的其余章节时我们都应记住这种依赖性。

在数字信号处理中，我们常常发现，必须表征离散时域信号的频率成分。当我们表征这种频率成分时，这种频率表示是在所谓的频域中进行的。用一个例子来说明，设有一个离散正弦波系列 $x_1(n)$ ，频率为 $f_0\text{Hz}$ ，如图1-3a左边的图所示。我们也可以图1-3a右边的图来描述 $x_1(n)$ ，图中显示，只有频率为1(用 f_0 为单位度量)这一种频率，没有其他频率成分，虽然我们在这里不详细讨论，但应注意，图1-3中的频域表示本身是离散的。

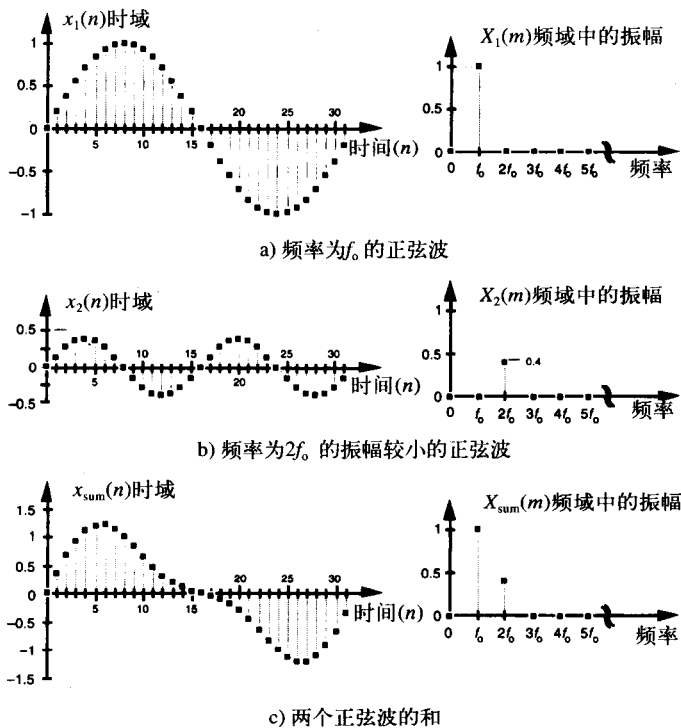


图1-3 时域和频域的图形表示

为了进一步说明我们的时域和频域表示，图1-3b示出另一个离散的正弦波 $x_2(n)$ ，其峰值振幅是0.4，频率是 $2f_0$ ， $x_2(n)$ 的离散采样值用公式表示为

$$x_2(n) = 0.4 \cdot \sin(2\pi 2f_0 n t_s) \quad (1-6)$$

两个正弦波 $x_1(n)$ 和 $x_2(n)$ 相加产生一个新的波形 $x_{\text{sum}}(n)$ ，其时域方程为

$$x_{\text{sum}}(n) = x_1(n) + x_2(n) = \sin(2\pi f_0 n t_s) + 0.4 \cdot \sin(2\pi 2f_0 n t_s) \quad (1-7)$$

因而其时域和频域表示如图1-3c所表示。我们来解释频域中的 $X_{\text{sum}}(m)$ ，在图1-3c中频谱 $X_{\text{sum}}(n)$ 显示出有一个 $f_0\text{Hz}$ 的频率成分和另一个振幅较小的频率为 $2f_0\text{Hz}$ 的频率成分。

图1-3说明了三件事。第一，时间序列用小写符合的变量名，如 $x_1(n)$ 中的“x”，频域变量用大写符号做变量名，如 $X_1(m)$ 中的“X”。 $X_1(m)$ 读作“谱X 1 m”。第二，因为时间序列 $x_1(n)$ 的频域表示 $X_1(m)$ 本身是一个序列(一个数据表)，所以我们用指标“m”来表示 $X_1(m)$ 中各个元素的序号。

我们可以像式(1-2)中的时间序列那样列出频域中的数据序列。例如对 $X_{\text{sum}}(m)$ 列出的数据为

$$\begin{aligned} X_{\text{sum}}(0) &= 0 \quad (\text{第1个 } X_{\text{sum}}(m) \text{ 的值, 指标 } m=0) \\ X_{\text{sum}}(1) &= 1.0 \quad (\text{第2个 } X_{\text{sum}}(m) \text{ 的值, 指标 } m=1) \\ X_{\text{sum}}(2) &= 0.4 \quad (\text{第3个 } X_{\text{sum}}(m) \text{ 的值, 指标 } m=2) \\ X_{\text{sum}}(3) &= 0 \quad (\text{第4个 } X_{\text{sum}}(m) \text{ 的值, 指标 } m=3) \\ &\vdots \end{aligned}$$

其中, 频率指标 m 为整数序列 $0, 1, 2, 3, \dots$ 。第三, 因为 $x_1(n)+x_2(n)$ 的正弦波互相之间的相移为零度, 所以实际上我们不需要繁琐地描述图1-3c中 $X_{\text{sum}}(m)$ 的相位关系。但是, 一般情况下, 频域序列的相位关系是很重要的, 我们将在第3章和第5章中讨论这个问题。

这里要记住的关键一点就是现在我们已经知道描述一个离散时间的波形可以有三种等价的方法。数学上, 我们可以用类似式(1-6)的时域方程。我们也可以用图形表示时域的波形, 如图1-3左边的图形所示, 我们还可以用其相应的离散频域图形描述, 如图1-3右边的图形所示。

还应注意, 我们所关心的离散时域信号不仅时间值要量化, 而且它们的振幅值也要量化。再有, 我们表示所有的数字量都是用二进制数, 所以表示离散数据值存在着一个分辨率或量化度的极限。虽然, 信号振幅量化很重要——在第12章中我们要专题研究——但现在先不急于详细讨论。

1.2 信号的振幅、幅度和功率

我们来定义两个重要的术语: 振幅(amplitude)和幅度(magnitude)。这两个术语在全书中都要用到。对于外行, 这些术语常常可以混用。当我们查词库时, 我们发现它们是同义词^①。但是在工程中, 它们有不同的含义, 因而我们讨论时必须弄清楚它们的差别。一个变量的振幅是在某一方向上偏离零点有多远的度量, 因此, 信号振幅可以是正的也可以是负的。图1-3中的时间序列表示三种不同波形的采样值的振幅。注意, 某些离散振幅值是正的, 而另一些是负的。

一个变量的幅度是与方向无关, 只考虑其偏离零点有多远的度量, 所以幅度总是正值。图1-4说明图1-3a中的时间序列 $x_1(n)$ 的幅度怎样等于其振幅, 而对于幅度, 其符号总是正的。我们用模的符号($| \cdot |$)来表示 $x_1(n)$ 的幅度。同时, 在数字信号处理文献中, 我们还发现幅度这个术语指的就是绝对值。

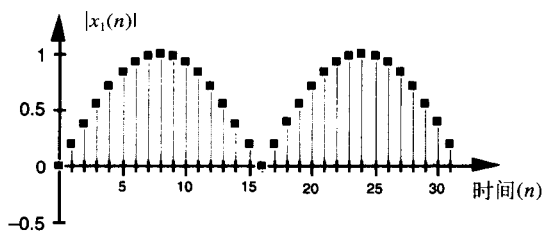


图1-4 图1-3a中随时间变化的波形幅度 $|x_1(n)|$ 的采样值

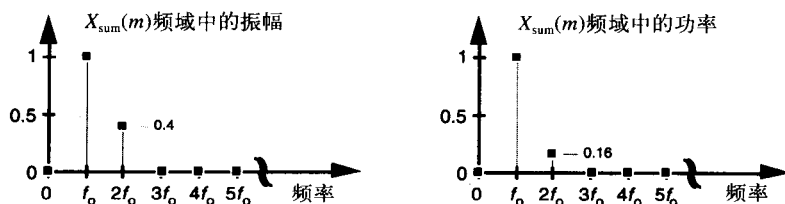


图1-5 图1-3c中随时间变化的波形 $X_{\text{sum}}(m)$ 的频域振幅和频域功率

① 当然, 外行是“这行以外的人”。对于工程师来说, 脑外科医生是外行。对于脑外科医生来说, 工程师是外行。