

[美] A.V.奥本海姆 R.W.余弗 著

数字信号处理 上册

华中工学院无线电技术教研室

葛果行译

73

数字信号处理

期 限 衣

下列最后之日期本书必须归还

华

1 9 8 0

PRENTICE HALL, INC., Englewood Cliffs, N. J.

338739

8/5/85

DIGITAL 数字
SIGNAL 信号
PROCESSING 处理

Alan V. Oppenheim [美]
Ronald W. Schaffer [美]

清华大学工程数字信号处理
教材

Alan V. Oppenheim Ronald W. Schaffer



1975

PRENTICE-HALL, INC., Englewood Cliffs, N. J.

序 言

本书是我们在数字信号处理领域中教学和科研活动的成果。编著本书的意图主要是想把它作为大学四年级或研究生一年级课程的教材。本书所依据的讲稿，曾在麻省理工学院电气工程系供一学期导论性课程使用，并在贝尔研究所供进修教育课程使用。这份讲稿也曾在麻省理工学院为期两周的暑期讲座课程中使用过三年；在修改增订的后期，还曾在美国各地的许多大学作为一学期课程的教材来使用。

作为一学期课程的典型安排应该是深入学习第一、二、三章，并从第四、五、六、七章中选学一些基本课题。而以本书的其余部分为基础，结合补充读物，则可组成第二学期较先进的论题与应用课程的教材。

学习这种性质的学科，必不可少的实际锻炼是导出一些新的结果，并将这些结果应用于解决实际问题。所以，本书的重要组成部分之一就是所收集的约 250 个课外作业题。著者的意图是想用这些习题来把书中所导出的结果加以延伸，并导出书中提到的某些结果，而且进一步说明其对实际应用的应用。（下略）

我们假定读者具有高等微积分的数学预备知识，包括复变函数论导论；并学过象大多数电气工程和机械工程课程设置中规定应讲授的连续时间信号的线性系统理论，其中包括拉普拉斯变换和傅里叶变换。对于具有这些预备知识的读者，本书内容是独立齐全的。具体地说，学习本书无需事先具有离散时间信号、 z 变换、离散傅里叶变换等方面的知识。

在第一章中，我们从离散时间信号和线性位移不变系统的定义开始，既介绍了使用卷积和的时域表示法，也介绍了使用傅里叶变换的频域表示法。在第二章中，我们把傅里叶变换的研究加以推广，进而讨论用 z 变换来表达的离散时间系统与信号的表示法。第二章大部分篇幅都用来研究 z 变换的定义和性质，以及线性位移不变系统的系统函数表示法。在第一、二两章的末尾，我们把一维观念简要地加以概括并推广到二维。在第三章中，我们引进了离散傅里叶变换。这种变换形成了许多数字信号处理技术的基础，变换的本身固有地建立在离散时间的概念上。除了研讨离散傅里叶变换及其性质之外，我们还引进了用离散傅里叶变换具体实现离散卷积的概念。这样，前三章就提供了离散时间信号表示法的基本概念。

在第一章中，我们讨论了线性位移不变系统，这类系统是可以由线性常系数差分方程来表示的。在第四章中，我们讨论了这类系统的实现，它们是由加法器、延迟器和系数乘法器所组成的数字网络。该章的大部分篇幅都用来导出各种重要的数字滤波器结构。该章所介绍的信号流图和矩阵表示法引出了数字网络理论。该章还讨论了数字网络的特勒根 (Tellegen) 定理，以及由此得出的一些网络灵敏度关系式。

在第五章中，我们提出了数字滤波器设计所涉及的一些基本论题，也介绍了较普通、较实用的数字滤波器设计方法，包括若干解析方法，以及算法技术即计算机辅助设计技术。

在连续时间线性系统理论中，傅里叶变换主要是表示信号和系统的一种解析工具。与之对比，在离散时域内，许多信号处理系统和算法却包括傅里叶变换的具体计算。第六章的讨论就是针对离散傅里叶变换的计算的。大部分篇幅都用来集中讨论一维

和多维序列的快速傅里叶变换算法。

在第七章中，我们介绍了离散希尔伯特变换。这种变换出现在种种实际应用中，包括逆滤波、实带通信号的复表示法、以及许多其他应用。它还对称为同态信号处理的一类信号处理技术有着特殊的意义，这类同态信号处理技术将在第十章中讨论。

在前七章的讨论中，我们假设正在论述的离散时间信号都是确定性信号。另一类重要的离散时间信号是随机信号，这类信号主要是用平均特性来表征的，例如相关函数及其傅里叶变换即频谱密度函数就是这类平均特性。因此，我们在第八章中介绍了有关离散随机信号的某些基本概念。虽然在各种情况下都出现随机信号，我们在第九章中却特别利用第八章的那些结果。在第九章以前的大部分讨论中，都假定信号在时间上是离散的，但在幅度上是连续的。然而在数字电子计算机中或者在使用数字硬件来表示信号时，有必要把幅度进行量化。这种幅度量化的影响，不仅与信号处理应用、而且与运算和字长的选择密切有关。利用第八章的结果可以把许多有限寄存器长度的影响表征出来。因此，我们在第九章中研讨了用加性噪声来表示量化影响的方法，并分析了对数字滤波和快速傅里叶变换算法的这些量化影响。

在第十章中，我们介绍了一类称为同态信号处理的信号处理技术。这类信号处理技术虽然是非线性的，但却以线性技术的一般化为基础，而线性技术的一般化乃是本书前面各章的焦点所在，因此可以根据较前几章中所提出的那些概念来加以理解。从而，这一章除了引进一类新的信号处理技术之外，还起着一种工具的作用——以复杂的方式利用本书前面所研讨的结果。此外，在本章中还介绍了同态信号处理的许多应用，我们希望：这些应用将给读者强调指出数字信号处理大体上的宽广应用范围。

最后一章引进了数字信号处理技术另一类重要的应用，就是随机信号的频谱估计。全书自始至终讨论过的许多技术在这一类问题中都是有用的。我们并不想要在第十一章中彻底研究这个课题，只是把它提出来作为一个很复杂的学科的初步导论。

在选择与准备本书所介绍的材料时，我们力图把重点集中在基本原理上，这些原理对于需要进行信号处理的各个不同的领域，都是广泛适用的。我们还舍弃了感到不适合于本书的一些细节问题。读者可以在本书的姊妹篇——L. R. Rabiner与B. Gold合著的《数字信号处理的理论与应用》一书中，找到许多这类细节问题以及一些其他方面的应用。

(以下为致谢部分及协作关系，从略。)

A. V. 奥本海姆

R. W. 余

弗

译 者 前 言

数字信号处理这一门源远流长但又新颖先进的学科分支，近十几年来有了惊人的发展，显示出强大的生命力。在我国的四化建设中也日益为科学、工程、教育界所重视。随着八十年代的来临，数字信号处理技术必将在我国迅猛地发展。

本书原为美国麻省理工学院四年级或研究生一年级的教材，并在贝尔研究所供大学毕业的工程技术人员进修教育课程使用。书中一开始就从离散时间信号与系统的定义出发，将全书建立在离散时间概念的基础上。虽然书中对连续时间信号与系统在必要时都进行了理论上的类比，也不忽视通过连续时间信号抽样产生离散时间信号的大量事实，但全书始终贯穿着独立完整的数字信号处理的理论体系。因此虽出版于一九七五年，由于内容比较系统、全面、深透，至今仍不失为这一学科分支基础理论的重要著作之一，可作为大专院校无线电技术（包括通信、雷达、水声等）、自动控制、计算机科学、信息工程和需要应用数字信号处理技术的各有关专业的研究生教材，以及教师进修、科技人员自学的参考书。我们为了教学急需，将本书译出以供本院师生使用。原书的篇幅较大，因此译本分上、下两册印出，上册包括前六章内容，下册包括后五章内容。

在翻译过程中，我们对原著中一些印刷错误或笔误作了改正，因为比较明显，故未一一注明。

数字信号处理这一学科分支是比较新的，译本中有部分名词、术语，国内虽有译名但未完全统一，个别术语则尚未见有相应的

译名。因此，在译名上难免有不妥之处。在排印过程中，有些兄弟院校的同志主动热情地来信提出有关译名的商榷意见，对此我们表示衷心的感谢。

本书上册译稿承万发贵、姚天任两同志分别对前四、五章，张肃文同志对第五章进行了校阅，提出了不少宝贵的修改意见。来祖怡等同志对译本的校对、出版等做了大量的工作。在此对他们致以深切的谢意。

由于译者水平有限，且翻译时间又较仓促，译文中错误、缺点在所难免，热忱希望读者给予指正。

译者

1979年10月

目 录

上 册

序言	i
译者前言	v
绪论	1
第一章 离散时间信号和系统	
1.0 引言	7
1.1 离散时间信号——序列	9
1.2 线性位移不变系统	13
1.3 稳定性和因果性	18
1.4 线性常系数差分方程	20
1.5 离散时间系统和信号的频域表示法	23
1.6 傅里叶变换的某些对称性质	30
1.7 连续时间信号的抽样	34
1.8 二维序列和系统	39
本章提要	44
参考文献	45
习题	46

第二章 z 变换

2.0	引言	62
2.1	z 变换	62
2.2	逆 z 变换	71
2.3	z 变换的定理和性质	79
2.4	系统函数	91
2.5	二维 z 变换	99
	本章提要	104
	参考文献	105
	习题	106

第三章 离散傅里叶变换

3.0	引言	120
3.1	周期序列的表示式——离散傅里叶级数(DFS)	121
3.2	离散傅里叶级数的性质	126
3.3	周期序列的 DFS 表示式的性质摘要	130
3.4	z 变换的抽样	131
3.5	有限持续时间序列的傅里叶表示式——离散傅里叶变换	135
3.6	离散傅里叶变换的性质	138
3.7	离散傅里叶变换的性质摘要	150
3.8	利用离散傅里叶变换得出的线性卷积	151

3.9	二维离散傅里叶变换	158
	本章提要	164
	参考文献	164
	习题	165

第四章 数字滤波器的流图和矩阵表示法

4.0	引言	187
4.1	数字网络的信号流图表示法	188
4.2	数字网络的矩阵表示法	195
4.3	无限冲激响应 (IIR) 系统的基本网络结构	202
4.4	转置型	209
4.5	有限冲激响应 (FIR) 系统的基本网络结构	211
4.6	参数量化的影响	224
4.7	数字滤波器的特勒根定理及其应用	234
	本章提要	244
	参考文献	245
	习题	248

第五章 数字滤波器设计技术

5.0	引言	267
5.1	根据模拟滤波器设计 IIR 数字滤波器	269
5.2	设计举例: 模拟-数字变换	286
5.3	IIR 数字滤波器的计算机辅助设计	309

5.4	FIR 数字滤波器的性质	317
5.5	利用窗函数设计 FIR 滤波器	319
5.6	FIR 滤波器的计算机辅助设计	333
5.7	IIR 和 FIR 数字滤波器的比较	354
	本章提要	356
	参考文献	357
	习题	362
第六章 离散傅里叶变换的计算		
6.0	引言	379
6.1	Goertzel 算法	382
6.2	时间分解快速傅里叶变换 (FFT) 算法	386
6.3	频率分解快速傅里叶变换 (FFT) 算法	400
6.4	N 为复合数的 FFT 算法	409
6.5	FFT 算法中的一般计算考虑	419
6.6	线性调频 z 变换算法	425
	本章提要	432
	参考文献	433
	习题	435

绪 论

数字信号处理这一学科领域根源于十七和十八世纪的数学，在许多各不相同的科技领域中已经成为重要的现代工具。这个学科领域的技术和应用，象牛顿与高斯一样古老，又象数字计算机与集成电路一样新颖。

数字信号处理所涉及的问题，是用数字或符号的序列来表示信号，以及对这些序列进行处理。这种处理的目可以是估计信号的特性参数，也可以是把信号变换成为在某种意义上较为合宜的另一种形式。经典的数值分析公式，诸如用作插值、积分和微分运算的公式，肯定是数字信号处理算法。另一方面，高速数字计算机的具备已经促进了日益复杂和高级的信号处理算法的发展；集成电路工艺的最新进展使得很复杂的数字信号处理系统的经济实现前景在望。

总的说来，信号处理有着丰富多采的历史，它在诸如生物工程、声学、声纳、雷达、地震学、语言通信、数据通信、核科学和许多其他科技的不同领域内的重要性是十分明显的。在许多应用中，例如，在脑电图（EEG）和心电图（EKG）的分析，或者在语言传输和语言识别的系统中，我们可能希望提取某些特性参数。另外，我们也可能希望从信号中消除噪声之类的干扰，或者修改信号，使之成为专家较易译释的形式。又如在通信信道上传输的信号，一般都受到多方面的干扰，包括信道失真、衰落以及背景噪声的插入等。接收机的目标之一就是要把这些干扰加以校正。在上述每一种情况下，都要求对信号进行处理。

当然，信号处理问题不限于一维信号。许多图象处理方面的应用就需要使用二维信号处理技术。在增强 X 射线时，在增强与分析供检测森林火灾或农作物灾害的空中照片时，在分析卫星气象照片时，以及在增强从月球和深空探测器来的电视传输信号时，都需应用二维信号处理技术。又如石油勘探、地震测量以及核试验监察中所需的地震数据分析，也要利用多维信号处理技术。

直到最近，典型的信号处理都是使用模拟设备来实现的。在五十年代，特别是在需要进行复杂信号处理的领域，有某些例外是显著的。例如，某些地球物理数据的分析就是这种情况，这些数据可以记录在磁带上供以后在大型数字计算机上处理。这类问题是使用数字计算机进行信号处理的先例之一。这种类型的信号处理一般不能实时完成；例如，只不过在几秒钟内收集的数据，往往需要计算机用几分钟甚至几小时的时间来处理。即使如此，数字计算机的灵活性仍然使这种处理方法极端引人注目。

在上述同一时期之内，信号处理中使用数字计算机，也出现了一种不同的方式。因为数字计算机灵活机动，所以用模拟硬件实现信号处理之前，先在数字计算机上模仿这个处理系统往往是有益的。采用这种方式，可以在投入财力和物力创建一种新的信号处理算法或新的信号处理系统之前，先在一个灵活的试验环境中对其进行研究。在麻省理工学院林肯实验室以及贝尔研究所完成的声码器仿真，就是这样一些仿真的典型例子。实现模拟信道声码器时，滤波器特性往往以一些不可预测的方式影响得出的语言信号的质量。因此，通过计算机仿真来调整这些滤波器特性，从而在制作模拟设备以前，先估价系统的质量。

上面列举的使用数字计算机进行信号处理的所有例子中，计算机在灵活性上呈现出惊人的优点。虽然如此，信号处理却不是经

常能实时完成的。因此，当时流行的想法是把数字计算机用来逼近或模仿模拟信号处理系统。与这种格调相一致，早期的数字滤波工作非常注重在数字计算机上编制滤波器程序的方法，以便把信号加以模数转换，继以数字滤波，随之以数模转换，这样，综合系统就逼近优质的模拟滤波器了。认为数字系统事实上可能实际用来在语言通信、雷达处理、或其他多种应用中实现信号处理的这种见解，即使在最乐观的时期看来，都是高度纯理论性的。当然，速度、成本和体积当时是有利于采用模拟部件的三大因素。

在数字计算机上对信号进行处理时，有一种自然趋势去试验日益复杂的信号处理算法。这类算法中有一些来源于数字计算机的机动灵活性，它们在模拟设备中未曾明显地具体实现过。因此，这些算法中有许多都被当作是有趣的但不够实际的观点来加以对待。这种类型的算法的例子之一是称为频谱分析和同态滤波的一套技术。当时已经在数字计算机上明显地证实：能够把这些技术有利地应用于语言带宽压缩系统、解卷积和消除回声。为了实现这些技术，要求算出输入的傅里叶变换的对数的傅里叶逆变换的具体值。这种傅里叶变换所要求的精确度和分辨力，对模拟频谱分析仪来说是不切实际的。这样一些信号处理算法的发展使得实现全数字式信号处理系统的想法甚至更加引人入胜。于是人们在数字式声码器、数字式频谱分析仪和其他全数字式系统的研究方面开始了积极的工作，希望这样一些系统最终将成为实际可行。

计算傅里叶变换的高效算法在1965年的发表，进一步加速了朝着数字信号处理新观点的演变。这类算法称为快速傅里叶变换，缩写为FFT。从许多观点来看，FFT都是意义深远的。对数字计算机上发展出来的许多信号处理算法，都要求比实时大几个

数量级的处理时间。这一点往往与以下事实紧密相联：频谱分析是信号处理的一个重要组成部分，而实现频谱分析的有效方法当时却并无所知。快速傅里叶变换算法把傅里叶变换的计算时间缩短了几个数量级。这就使得有可能实现日益复杂的信号处理算法，这些算法具有允许与系统相互作用的处理时间。而且，快速傅里叶变换算法事实上在专用数字硬件中是可以实现的，这就使许多过去看来不切实际的信号处理算法，都开始显得能用专用数字硬件来实现了。

快速傅里叶算法的另一个重要含义，就是它的本身固有地建立在离散时间的概念上。它是针对离散时间信号或序列的计算的，并且自有一套离散时域中的精确的性质和数学，而不单纯是对连续时间傅里叶变换的近似。这一点的重要性在于，它有促使使用离散时间数学来把许多信号处理概念和算法重新表达成公式的效果，从而这些技术形成了在离散时间域中的一套精确的关系。这就代表了一种概念的转变，不再认为在数字计算机上的信号处理只不过是模拟信号处理技术的近似。有了这种概念的转变，人们对新的或再生的数字信号处理领域，便发生了强烈的兴趣。

数字信号处理技术与应用正以惊人的速度在发展着。随着大规模集成电路的问世，从而引起数字部件成本降低、尺寸缩小，益之以计算速度的加快，数字信号处理技术的这类应用正在不断发展。现在已经实现了抽样率在兆赫范围的专用数字滤波器。已经有了用来实现高数据率的快速傅里叶变换的专用处理机的商用产品。简单的数字滤波器已经在电路芯片上集成出来。当前在讨论语言带宽压缩系统时，几乎全都朝着实现全数字式的方向，因为这些现在都是最实际可行的。数字处理器也形成了许多现代雷达和声纳系统整体的组成部分。除了研制专用数字信号处理硬件之