

数字信号 处理与通信

袁保宗 编著 朱雪龙 审阅

人 民 邮 电 出 版 社

数字信号处理与通信

袁保宗 编著
朱雪龙 审阅

人民邮电出版社

内 容 简 介

本书共十章，包括Z变换与数字网络基础、数字滤波器设计、离散付立叶变换及其快速计算、沃尔什变换、随机信号的特性与处理、话音信号的高效编码、数字话的可靠性传输、图象信号的处理、通信系统的计算机模拟与数字处理方法等内容。前六章属于基础理论。后四章属于具体应用。

本书可以用作高等院校通信、控制、计算机等专业高年级学生与科技工作者的参考书。

数字信号处理与通信

袁保宗 编著

朱雪龙 审阅

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

开本：787×1092 1/32 1981年10月 第一版

印张：15 4/32 页数：242 1981年10月河北第一次印刷

字数：345千字 印数：1—7,800册

统一书号：15045·总2470—无6132

定价：1.55元

序 言

数字信号处理是一门新兴的学科，广泛应用于通信、测量、雷达、声纳、地震分析等各个领域。本书的目的在于为这些领域的科技工作者和大专院校有关专业高年级学生，提供一本数字信号处理的基础理论及应用知识的入门参考书。

本书分两大部分：第一至第六章是基础理论部分。对数字信号处理的技术基础和主要数学工具作了较详细的讲述，为读者研究这门学科打下一个较好的基础。第七至十章是本书的应用知识部分。其中第七、八两章讲话音信号的处理及其应用，第九章讲图像处理，第十章讲计算机在通信系统模拟中的应用，它们与近代通信技术均有密切关系。

本书是根据作者多年来从事话音信号处理科研工作中的体会、历年来讲述数字信号处理的讲稿及参考近年来国内、外有关书籍、文献编写而成。初稿承清华大学无线电系朱雪龙、诸庆麟、曹志刚、郑君里、杨为理等同志认真审阅，提出了宝贵的改进意见。在编写过程中，北方交通大学杜锡钰教授与电信系有关教研室的同志们，曾给予指导和帮助。在清稿和数字计算工作中，得到林碧琴、胡淑文、阮秋奇等同志的热情协助。作者谨向他们表示感谢。

由于作者水平有限，书中一定会有许多错误或不足之处，欢迎读者批评指正。

作者

1980年2月于北方交通大学

前 言

信号处理技术在通信、测量、雷达、声纳以及地震分析等学科中，早已普遍采用。但是，近二十年来，由于电子计算技术的推广、大规模集成电路的发展以及微处理机的问世，信号处理技术又增添了许多新的内容。利用数字技术与电子计算机来解决信号处理中的一系列问题，可获得过去用模拟技术所不可比拟的新成果，使它在更广泛的生产和研究领域中得以推广运用。因此，数字信号处理逐渐形成为一门新兴的学科。

数字处理技术与模拟处理技术相比较，虽有许多共同之处，但也包含了概念和方法上的极大差异。首先，在数字系统中遇到的不是时间及幅度上连续的信号，而是时间离散与幅度量化后的数字序列。其次，从使用部件来说，模拟系统运用电阻、电容、电感等元件组成，而数字系统则由存储器、运算器和控制器等部件、通过编制程序来完成。另外，系统功能的变化与调整，在模拟系统中是靠改变元件数值与组合，而在数字系统中则是改变所用程序的结构。正因为有这些特点，数字系统在概念上与使用的数学工具方面也有许多新的内容。对数字系统这些新的概念、理论、方法与特点作比较系统的阐述，就是数字信号处理学科的基本内容。

就信号分析来说，由于处理对象是离散信号，使用的数学工具主要是离散付立叶变换。为了利用计算机对大量数据进行实时分析，出现了许多加快运算速度的算法，统称为快速算法。快速算法的分析与应用，在数字信号处理中占有相当重要

的地位。

从系统特性的动态描述来看，模拟系统用微分方程、运算微积；数字系统用差分方程与 Z 变换。虽然它们在内容上有密切联系，但也有一定差别。以前大学的基本教学内容中都没有讲数字系统。对于拟从事这方面的研究工作的工程技术人员，补充学习有关 Z 变换的内容，对掌握数字信号处理技术是很有益的。

利用数字计算机的运算功能，可以对模拟系统的部件进行模拟，这也是数字处理的一个特点。例如检波功能在计算机上可以用取绝对值来完成；两个信号相互调制可以用乘法运算来完成；放大器可以用乘以常数的方法来完成等等。但滤波器的功能利用数字技术实现时却遇到许多新的理论与方法问题。因此利用数字技术实现滤波功能的数字滤波器，成了数字信号处理中很重要的一个分支，使数字滤波器设计与计算方法成为研究信号处理必不可少的内容之一。在研究图象等二维信号时，还运用两维的数字滤波器概念，这在模拟系统中是很少见到的。正是由于有在计算机上进行数学运算的方便条件，许多用模拟方法不易实现的过程，采用数字技术就变得非常容易，因此也出现了许多新的处理方法，例如：同态处理(*Homomorphic processing*)，线性预测处理，逻辑判别与图形识别等。推广这些方法，便组成了信号处理的重要应用。

最后，由于用计算机可以进行动态和随机系统的模拟试验工作，加上改变程序非常灵活，对科学研究的方法已经产生了重大的影响。现在大多数的科学研究课题，都是利用计算机作为主要工具，而数字信号处理在其中发挥了重要作用。这也是这门学科所以引人关注的原因之一。

综上所述，数字信号处理包含离散信号的描述、离散系统

的分析、数字滤波器的设计、各种快速变换运算以及系统模拟等内容。读者掌握了以上这些方面的概念与方法，了解它们目前应用的情况与范围，将不难结合自己所从事的工作来应用信号处理技术，并加以推广。

目 录

前言	(1)
第一章 数字信号处理的主要应用	(1)
1.1 频谱分析	(2)
1.2 系统模拟	(3)
1.3 数据的压缩与扩张	(5)
1.4 信息提取与识别	(6)
第二章 Z 变换与数字网络基础	(8)
2.1 数字信号序列	(8)
2.2 取样定理	(10)
2.3 折迭误差	(15)
2.4 Z 变换的定义	(18)
2.5 Z 变换的收敛域	(20)
2.6 几种实际信号序列的 Z 变换	(23)
2.7 Z 变换的性质	(26)
2.8 由 Z 变换求原序列	(40)
2.9 由拉氏变换求 Z 变换	(49)
2.10 Z 变换与频域特性	(52)
2.11 网络特性的计算机模拟	(55)
2.12 数字信号通过数字网络	(60)
2.13 数字滤波器的结构	(62)
2.14 由数字网络求传输函数	(69)
2.15 二维 Z 变换	(73)
第三章 数字滤波器设计	(75)
3.1 线性相移 FIR 滤波器的一般特性	(76)

3.2	由付立叶级数求 <i>FIR</i> 滤波器系数	(82)
3.3	开窗作用	(86)
3.4	频率取样法设计滤波器	(92)
3.5	线性相移 <i>FIR</i> 滤波器的机辅设计	(95)
3.6	<i>IIR</i> 数字滤波器的设计要点	(98)
3.7	双线性 <i>Z</i> 变换	(101)
3.8	布特渥斯低通滤波器	(103)
3.9	契比雪夫低通滤波器	(118)
3.10	椭圆函数低通滤波器	(125)
3.11	高通数字滤波器设计	(127)
3.12	带通(带阻)数字滤波器设计	(131)
3.13	<i>IIR</i> 滤波器的机辅设计	(132)
第四章	离散付立叶变换及其快速算法	(134)
4.1	离散付立叶变换的定义	(134)
4.2	<i>DFT</i> 的物理概念	(137)
4.3	<i>DFT</i> 的性质	(140)
4.4	<i>DFT</i> 的矩阵表示法	(146)
4.5	相关与卷积运算的矩阵表示法	(150)
4.6	功率、振幅及相位谱序列	(153)
4.7	循环卷积与线性卷积	(155)
4.8	循环卷积的叠加	(160)
4.9	二维 <i>DFT</i>	(161)
4.10	快速付立叶变换(<i>FFT</i>)算法的提出	(163)
4.11	用迭代法求 <i>FFT</i>	(165)
4.12	<i>FFT</i> 计算流程——时域分组方法	(170)
4.13	比特倒转程序	(179)
4.14	<i>FFT</i> 算法程序	(181)
4.15	另一种 <i>FFT</i> 算法——频域分组方法	(185)
4.16	利用 <i>FFT</i> 计算信号频谱	(189)

4.17	利用 FFT 求相关序列	(190)
4.18	利用 FFT 求卷积——快速卷积	(191)
4.19	利用 FFT 求 $Chirp$ - Z 变换	(193)
第五章	沃尔什变换	(197)
5.1	拉特马赫函数	(197)
5.2	沃尔什函数序列	(199)
5.3	沃尔什函数的产生方法	(206)
5.4	沃尔什函数序列的性质	(209)
5.5	快速沃尔什哈特马变换($FWHT$)	(213)
5.6	$FWHT$ 计算程序	(220)
5.7	循环位移和模 2 位移	(227)
5.8	位移对沃尔什系数的影响	(230)
5.9	$(WHT)_w$ 谱	(246)
5.10	模 2 位移的序列相关与卷积	(250)
5.11	二维沃尔什变换	(252)
5.12	小结	(253)
第六章	随机信号的特性及处理	(255)
6.1	时间离散的随机过程	(255)
6.2	集合平均值	(257)
6.3	时间平均值	(259)
6.4	自相关序列的性质	(260)
6.5	随机过程的功率密度谱	(260)
6.6	随机序列通过线性系统	(262)
6.7	线性系统输入、输出信号间的互相关序列	(265)
6.8	平稳过程的自相关矩阵	(266)
6.9	自相关矩阵的相似变换	(268)
6.10	用矩阵求解随机过程的线性滤波	(270)
6.11	随机信号的最佳滤波	(275)
第七章	话音信号的高效编码	(281)

7.1	话音信号产生的数字模型	(282)
7.2	用预测法确定正弦信号的参数	(289)
7.3	衰减振荡波的预测	(294)
7.4	复合信号的预测	(298)
7.5	随机信号的线性预测	(301)
7.6	协方差法与自相关法确定预测参数	(304)
7.7	预测参数方程组的解法	(311)
7.8	线性预测声码器的原理与实现	(318)
7.9	共振峰声码器原理	(326)
7.10	600比特低速率共振峰声码器	(334)
7.11	信道式声码器	(335)
7.12	同态声码器	(346)
7.13	简化反滤波法提取基音(<i>SIFT</i>)	(349)
7.14	平均幅差函数提取基音(<i>AMDF</i>)	(351)
7.15	搜索滤波器提取基音	(352)
7.16	话音识别	(355)
7.17	语音合成	(360)
7.18	小结	(363)
第八章	数字话的可靠性传输	(365)
8.1	基本数据变换方法	(366)
8.2	序列网络方法	(369)
8.3	分段时序重排方法	(376)
8.4	样点时序重排方法	(387)
8.5	伪噪声线性变换法	(392)
8.6	<i>Adaptifon</i> 系统	(396)
8.7	线性预测参数的处理	(398)
第九章	图像信号的数字处理	(399)
9.1	预测编码	(400)
9.2	变换压缩	(409)

9.3	图像的修复	(416)
9.4	图像的增强	(421)
9.5	模式识别	(423)
第十章	通信系统的计算机模拟及其它数字处理方法	(432)
10.1	计算机模拟的基本思想	(433)
10.2	信号与噪声源的模拟	(437)
10.3	信号通过线性电路的模拟	(441)
10.4	调制与解调方法的模拟	(443)
10.5	$\Delta M/PCM$ 码型转换	(446)
10.6	TDM/FDM 变换	(450)
10.7	低、中速数传机的模拟	(458)
参考文献		(463)

第一章 数字信号处理的主要应用

数字信号处理的内容非常广泛。本书作为入门参考书，有必要对它的基本方法与应用先做一个粗略的介绍。通过介绍，不仅可使初次接触数字信号处理的读者了解其概貌，更可使他们特别注意去阅读与掌握书内与自己工作有关的内容。

目前，常见的数字信号处理系统可以用下面图 1.1 的方框图表示。其中信号源是需要处理的对象，一般是模拟信号源。例如雷达、声纳中接收的回波信号；音频的话音信号或视频的

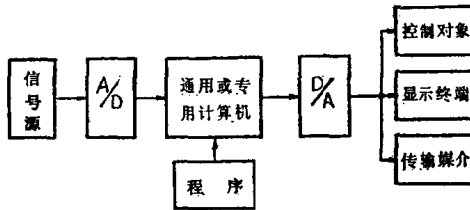


图 1.1 数字处理系统

图象信号；在自动控制系统中由传感器获得的感应信号。以上这些模拟信号不能直接进入数字计算机处理，需要经过模拟/数字（以后简称 A/D ）转换器、编成数字信号序列，才能进一步用专用的或通用的计算机加工处理。采用通用机时，容易变化程序，模拟各种方案比较灵活。不论专用或通用机，处理的结果仍然是数字信号。为了控制某种对象，需要将数字信号经过数字/模拟（简称 D/A ）转换器，恢复成模拟信号（有时可以通过显示器将结果显示出来）。为了远程运用，还需要将

信号送给传输设备，经过信道在其他地点完成预定的工作。

在上述的处理过程中， A/D 与 D/A 转换设备是专用的硬件设备，我们不准备再作介绍。控制与显示装置也不属信号处理范围。我们所要研究的只是如何编制各种算法，使电子计算机能够完成预定的信号处理任务。下面按不同的任务将数字信号处理的应用作一简单的介绍。

1.1 频谱分析

频谱分析是信号分析中最常用的方法之一。在过去的模拟系统中，主要靠滤波器来实现。由于器件的限制，滤波器的特性不能满足要求。例如精度不高；过渡带较宽；特性的一致性差；改变频率与带宽不灵活等等。特别是在低频运用时，电容、电感体积很大，有些原理上虽然可行的方案，在实际上不能实现。现在采用数字技术之后，情况就完全不同了。分析的方法，除了采用数字滤波器外还可以采用快速付立叶变换，不论精度和速度都有了相当的提高。

采用数字滤波器代替模拟滤波器后，同一个滤波器硬件可以实现多路复用。工作频率愈低，复用程度愈高，滤波器的选择性可以做得更好，更适用于声纳，雷达或地震波分析的情况。由于数字滤波器精度高，只要是字长与计算方法相同，用不同的计算机可以得到完全相同的结果。这种特性上高度的一致性，正是可用于精密分析的重要条件，也可为信号的识别提供可靠的条件。此外，利用可编程序，还可以实现搜索滤波，这在某些场合也是很有用的。图1.2是频谱分析用的计算框图。图中我们用的是快速付立叶变换（简称 FFT ）方案。经过 A/D 转换后的信号，由计算机进行 FFT 运算。计算出频谱的实部和虚部。再进行一次运算，可以获得频谱的幅值与相位。如果需

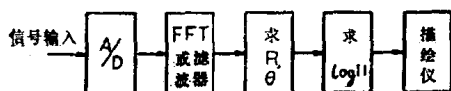


图 1.2 频谱分析的框图

用分贝表示频谱的强度，可以再进行一次对数运算。最后将结果在描绘仪上记录下来。这样几次运算，当然运算量会相当大，但是采用高速计算机或专用硬件，仍可以做到实时的分析。如果输入信号是非周期的过程，频谱还可以用数字的形式，通过三维图形显示出来，必要时也可以再次输入计算机进行处理。正因为频谱分析用途很广，因此，它是信号处理的基本内容之一。

频谱的分析，从本质上说是信号的一种正交展开。正交展开的方法种类甚多，诸如哈特马 (*Hadamard*)，沃尔什 (*Walsh*) 勒让德 (*Legendre*) 和卡赫宁-洛维 (*Karhunen-Loeve*) 等等，过去用模拟方法很难把它们付之实现，现在采用数字计算机方法，就很容易实现。因此这类正交变换在数字信号的处理中得到广泛应用，从而使频谱分解的内容也显得更加丰富和深入。

1.2 系统模拟

系统模拟的含意是用计算机模拟系统的动态特性。过去当从事某项系统的研究时，往往要经过方案探讨，理论计算，部件试验，单机调试及系统试验等一系列过程。在这一整个过程中，要投入大量的人力、财力和物力。试制的样机种类繁多，往往由于元器件质量不好与工艺过程差，达不到预期的性能指标。在各类样机尚未完成之前，系统试验根本无法进行。因此，整个大系统的性能也无从事先估计。现在采用数字处理方

法，把整个大系统中各部件环节用数学模型比较正确地描述出来，然后在计算机上进行系统模拟，不但节省人力、物力，而且大大缩短研究周期。在计算机上还可以同时对几种方案进行比较，选出最为优秀的方案，付诸实验试制。这是现代化研究不可缺少的环节。

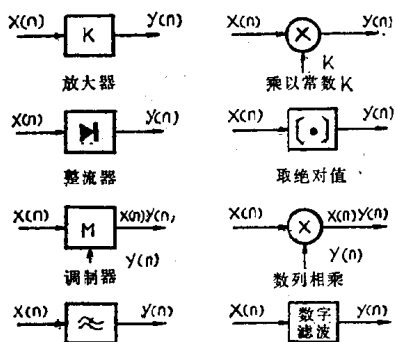


图 1.3 通信部件的模拟

就模拟通信部件来说，不少部件模拟起来还比较简单。如图1.3所示，放大器可以用乘以常数 K （放大倍数）实现；检波器（图中的整流器）可以用取绝对值实现，符号表示为 $[\cdot]$ ；调制或解调器可以用两个信号数列相乘实现；最后滤波器可以用数字滤波器（ $D.F.$ ）实现。根据这样的办法，图1.4(a)所示的接收机可以用图1.4(b)所示的计算流程来进行特性模拟。因此可将研究工作的进程大大缩短。

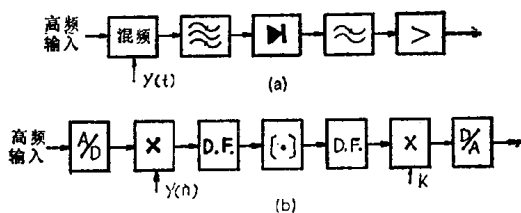


图 1.4 简单接收机的模拟

研究数字通信的调制解调器（简称MODEM）时，设计固定式自适应均衡器往往非常繁琐。采用计算机辅助设计或模

拟，选择参数则比较简便。

1.3 数据的压缩与扩张

对频带压缩的功用，大家都比较清楚。现在利用数字计算机进行信号处理，它却有了新的内容。例如语音的传输和处理：经过数字编码后的一路语音，起码有32~64千比特/秒的数据率。如果不经压缩就利用数字信道来传输，将很不经济。为了提高信道的利用率，必须压缩语音数码率。如果是用计算机存储语音，那就更需要将语音数据进行压缩。否则，一个1.024兆比特的存储器只能存放 $1024/64=16$ 秒钟的语音，当然非常不经济。采用声码器办法，将语音数据率压缩到2.4千比特/秒或600比特/秒。对于语音数字传输和计算机存储都是非常必要的。

与数据压缩相反的数据扩张，也是很有用的技术。近来为了国防通信的需要，实现发射信号的功率荫蔽与抗电子干扰，采用了数据扩张，即所谓扩频技术。图1.5(a)和(b)给出数据压缩和扩张的方框图。用300兆比特/秒的数码率传送64千比特/秒的语音通信装置，可以使敌方对此信号难以侦察或干扰。

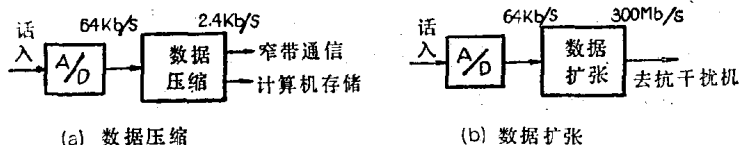


图 1.5 语音数据的压缩和扩张

数据压缩在图象处理的应用方面也十分引人注目。将视频信号数字化，数据率更是高得惊人。电视的数据压缩更是迫切需要。现在各种图象压缩的方法都已有成效。大压缩比的处理设备也正在研究之中。