

847960

5017

数字
信号
处理

陈永彬 编

DIGITAL
SIGNAL
PROCESSING



南京工学院出版社

数字信号处理

陈永彬 编

南京工学院出版社

内 容 提 要

本书内容按信号与系统观点分成四章：第一章绪论；第二章数学基础，讨论差分方程、傅氏变换、Z变换和离散傅氏变换；第三章数字滤波器，讨论IIR和FIR数字滤波器及其计算机辅助设计以及硬件实现中的问题；第四章数字谱分析，讨论各种FFT算法原理、确定性与随机性信号谱分析、模型法信号参数分析以及倒谱分析。

责任编辑 张 克

数 字 信 号 处 理

陈永彬 编

南京工学院出版社出版

南京市四牌楼2号

江苏省新华书店发行 工程兵工程学院印刷厂印刷

开本787×1092毫米 1/16 印张17.625 字数407千字

1987年5月第1版 1987年5月第1次印刷

印数1—4000册

ISBN 7-81023-005-(0)/TN·5

书号：15409·018 定价：3.00元

前 言

六年前，作者曾为电子仪器专业大学生主编过全国第一本“数字信号处理”教材，并由国防工业出版社出版（1980年12月内部发行版）。经过六年的教学实践，作者认为这门课程是电子类各专业大学生和研究生的重要课程，所以有必要加以修改并重新出版。

与六年前版本不同之处在于：删去专用于电子仪器的内容，加强了理论基础，增加了绪论一章和信号参数模型（线性预测）一节，此外增多了数字滤波器计算机辅助设计，硬件实现时有限字长的影响，倒谱分析等内容使之适用于电子类各专业。

电子类专业的基础课是电路、信号与系统。电路方面已有不少课程与教材，但在信号与系统方面，国内仍多沿用模拟的信号分析与系统设计的教材，已不能适应时代的要求。所以，用数字信号分析与数字系统设计的观点来设立课程与编写教材是非常必要的。本书就是按照这个观点进行编写的。

按此观点全书分为四章：第一章绪论，第二章数学基础，第三章数字滤波器——数字系统的设计，第四章数字谱分析——信号的数字分析，结构完整。

国内曾出版过同名教材，但大都着重讨论数字滤波器，而对信号分析尤其是随机信号分析的内容未作介绍，作者认为这方面的内容是数字信号处理的重要组成部分。

本书各章附有复习思考题，习题和参考文献，便于自学；另有习题答案和实验指导书以及教学用的幻灯片一套，便于教学。

陈永彬

1986年12月

目 录

第一章 绪 论

§ 1—1 信号、处理、系统·····	(1)
§ 1—2 数字信号处理的发展历史·····	(3)
§ 1—3 数字信号处理的学科范围·····	(5)
§ 1—4 数字信号处理的应用范围·····	(7)
参考文献·····	(9)

第二章 数学基础

§ 2—1 离散信号与系统·····	(10)
2—1—1 序列——离散时间信号·····	(10)
2—1—2 线性移不变离散系统——卷积和·····	(12)
2—1—3 系统的时域分析——差分方程·····	(14)
2—1—4 序列和系统的频域分析·····	(17)
§ 2—2 Z变换·····	(22)
2—2—1 Z变换·····	(22)
2—2—2 Z反变换·····	(27)
2—2—3 Z变换的性质·····	(30)
2—2—4 系统的Z域分析·····	(34)
§ 2—3 离散傅里叶变换·····	(36)
2—3—1 离散周期序列和离散傅里叶级数·····	(36)
2—3—2 有限长度序列和离散傅里叶变换·····	(44)
复习思考题·····	(53)
习题·····	(54)
参考文献·····	(57)

第三章 数字滤波器

§ 3—1 IIR数字滤波器设计·····	(58)
3—1—1 IIR数字滤波器的设计方法·····	(58)
3—1—2 冲激响应不变变换法·····	(65)
3—1—3 双线性变换法·····	(74)
3—1—4 低通型至其他型类的频率变换·····	(83)
§ 3—2 FIR数字滤波器设计·····	(88)
3—2—1 FIR数字滤波器的设计方法·····	(88)
3—2—2 窗口设计法·····	(93)
3—2—3 频率取样设计法·····	(102)
§ 3—3 数字滤波器的计算机辅助设计·····	(113)
3—3—1 IIR数字滤波器的计算机辅助设计·····	(113)

3—3—2	FIR数字滤波器的计算机辅助设计	(119)
§ 3—4	数字滤波器的实现	(128)
3—4—1	数字滤波器的网络结构型式	(128)
3—4—2	系数的量化效应	(133)
3—4—3	取样模拟信号时的量化噪声	(139)
3—4—4	运算过程中有限字长的影响	(143)
复习思考题		(154)
习题		(156)
参考文献		(158)

第四章 数字谱分析

§ 4—1	快速傅里叶变换	(161)
4—1—1	库利-图基算法和桑德-图基算法	(161)
4—1—2	N为组合数的快速傅里叶变换算法	(168)
4—1—3	位串行算法	(175)
4—1—4	WFTA算法	(179)
§ 4—2	确定性信号序列的谱分析	(185)
4—2—1	滑动滤波器型谱分析器	(187)
4—2—2	Chirp滤波器型谱分析器	(191)
4—2—3	CZT型谱分析器	(193)
4—2—4	分段卷积型谱分析器	(200)
§ 4—3	随机性信号序列的功率谱估值	(205)
4—3—1	离散随机信号	(205)
4—3—2	相关法功率谱估值	(210)
4—3—3	周期图法功率谱估值	(221)
§ 4—4	信号的模型参数分析	(227)
4—4—1	参数信号模型	(227)
4—4—2	全极信号模型	(230)
4—4—3	自相关法和协方差法	(235)
4—4—4	斜格法	(240)
4—4—5	极零信号模型	(249)
§ 4—5	信号的倒谱分析	(253)
4—5—1	同态信号与同态系统	(253)
4—5—2	乘积同态处理与卷积同态处理	(257)
4—5—3	复倒谱的性质	(260)
4—5—4	无相位卷绕算法	(264)
复习思考题		(270)
习题		(272)
参考文献		(275)

第一章 绪 论

让我们先从信号、处理、系统的定义来阐明数字信号处理的含义；接着，回顾一下数字信号处理的发展历史，而后再来介绍数字信号处理的学科范围和应用范围。

§ 1—1 信号、处理、系统

信号处理是研究对信号进行变换的一门学科，处理即变换。例如，如果一个音频信号混有交流哼声，听起来就令人生厌，但如果用一个“点阻滤波器”将交流哼声滤掉，听起来就会使人满意。点阻滤波器就是在交流哼声频率处有很大衰减，而在其他频率处都具有均匀响应的滤波器，如图 1-1 所示。这一滤除交流声的过程就是信号处理，或即将含有某种信息

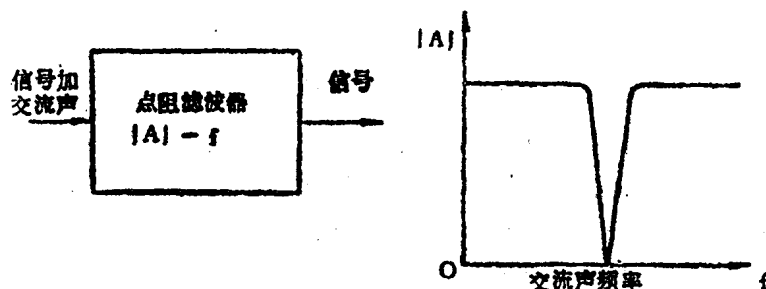


图 1-1 信号处理的一个例子

的信号，送到一个处理设备（又称为系统，如点阻滤波器）中去，使之变换（又称为处理）成为人们所希望的信号，从而提取其中信息的过程叫做信号处理。

下面，我们将分别讨论信号、处理、系统的含义以及实现处理的有关问题。

信号

信号可定义为传递信息的函数，例如语言信号、雷达信号、声纳信号和图象信号等。信号的信息包含在信号随变量的变化情形之中，例如 $s(t)$ ， $S(f)$ 就是两种信号，前者的变量是时间，后者的变量是频率。

$s(t) = A \sin \omega t$ 表示峰幅为 A ，角频率为 ω 的正弦波时域信号。 $S(f) = 1$ 表示幅值为1且均匀分布的频域信号，这个信号相当于时域的冲激信号。

我们在这里遇到两种变量：时间 t 和频率 f 。但人们习惯上总是采用以时间为变量的时间波形来表示信号，这是因为频率为变量的信号实际上就是时间为变量的信号的频谱。或者说， $S(f)$ 就是 $s(t)$ 的傅里叶变换， $S(f)$ 可由 $s(t)$ 通过傅里叶变换来得到。

除了时间和频率这两种变量之外，信号还可以是空间座标为变量的函数。例如，图象信号 $s(x, y)$ 或人体断层信号 $s(x, y, z)$ 等。但是，这类信号的处理也可以采用时间变量信号的处理方法。例如，对信号 $s(x, y)$ 进行傅里叶变换或其它变换等。因此，我们今后只讨论以时间为变量的信号。从普遍意义上说，信号的变量 t 可以是连续的，也可以是离散的。它可以

在任意 t 值时使信号的幅值都有定义, 即 $s(t)$; 也可以只在某些 t 值上 (最常用的是在等间隔时间 $t=nT$ 处) 才有定义, 即 $s(nT)$ 。这一从 $s(t)$ 到 $s(nT)$ 的过程称为 **取样 (等间隔取样)**。这里 n 是整数, T 是时间间隔。如图 1-2 (a), (b) 所示。 $s(t)$ 、 $s(nT)$ 分别称为 **连续时间信号** 和 **离散时间信号**。

另外信号的幅值也可以是连续的或离散的。幅值离散化的方法是用有限位数的数字 (用舍入法或截尾法等进行离散分层) 来表示幅值, 这个过程称为 **量化**。按照这种观点, 信号可分为 **连续幅值信号** 和 **离散幅值信号** 两种。

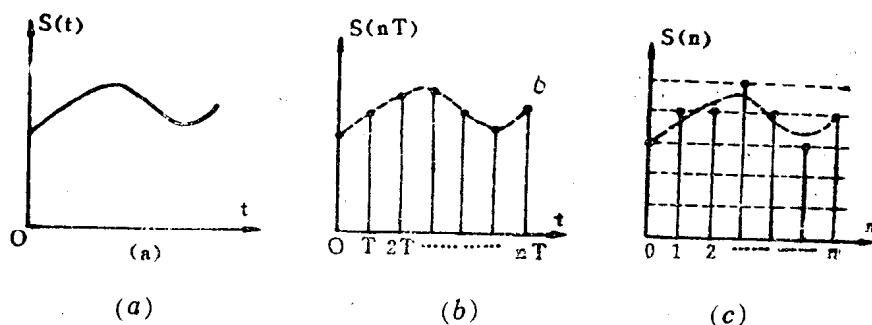


图 1-2 信号的分类

由取样和量化来组合, 信号可分为三种可能的形式: **模拟信号**—— $s(t)$, 连续时间、连续幅值的信号。**离散时间信号**—— $s(nT)$, 离散时间、连续幅值的信号。**数字信号**—— $s(n)$, 离散时间、离散幅值的信号。如图 1-2 (a), (b), (c) 所示。

三种信号中最常用的模拟信号 $s(t)$ 和数字信号 $s(n)$ 二种。离散时间信号 $s(nT)$ 在使用电荷耦合器件 CCD 作为处理设备时也用到; 在数字信号处理中, 如果暂不考虑量化问题时 (即暂不考虑数字实现时), 也常用到它。而且此时往往也用 $s(n)$ 这个符号, 反而将量化后的数字信号用符号 $s_0(n)$ 来表示。

系统

系统可定义为处理信号的设备。实际的处理设备种类繁多, 如滤波器、频谱仪、相关器和调制解调器等。总之, 凡能将信号加以变换、达到人们要求的各种设备都可以称为系统。

系统常按在其中进行处理的信号来分类。因此, 可分为 **模拟系统**、**离散时间系统** 和 **数字系统** 三类。

处理

处理就是变换, 即用系统对信号进行变换的过程。本课程主要讨论离散时间信号 (又称为序列) 的处理问题。因此, **数字信号处理** 是研究用数字或符号表示的序列来描述信号以及对这些序列进行处理的一门学科^[1]。处理的方法视处理目的而定。

实现

任何数字系统在进行实际处理时都可以有软件和硬件两种实现方式或方法:

软件实现是用一台通用数字电子计算机运行程序来实现, 其优点是一机分时多用, 而缺点则是费时。软件实现之所以费时, 是由于从磁带或磁盘上调用程序需要时间 (包括将高级语言的程序翻译成计算机可执行的机器指令的时间等)。另外, 编程人员的编程技巧, 程序

设计的好坏,也关系到运行它所需时间的多少。况且,编写的程序一般都有一定的不合理性,因而运算也就要多花时间。

硬件实现是用基本的数字硬件(如运算器、存储器、控制器、输入/输出接口等)搭成专用目的的处理设备来实现,其优点是容易做到**实时处理**,缺点是设备只能专用。

随着变量时间 t 的推移,信号常表现为信号流的形式。所谓实时处理,是指随着信号的不断抵达,系统能及时地、不断地进行处理并输出结果,不因处理时间过长而引起“堆积”现象。硬件实现容易做到实时处理的原因是由于可以根据专门的处理要求或技术指标来设计最节省时间的算法和硬件结构。如谱分析器可考虑用维纳格勒(Winograd)算法、数字滤波器可考虑用位串行算法等。其次,硬件实现时它的程序已编成运算器可执行的机器指令形式了,不需调用磁带或磁盘的时间。此外,硬件实现的控制器可设计最佳操作时间表,使设备的各部分协调地处于“忙”的状态,而不处于“等”的状态…。因此,有时硬件实现比软件实现可以节省几十倍乃至几百倍的时间。

硬件实现时设备只能专用的缺点是明显的。

但是,现在有一种称为“**通用的专用硬件**”的新的实现方式。它也是用硬件实现的,具有易于实时的优点。同时,由于其存放程序指令的存储器是可更换的固块,所以又具有软件实现的多用性优点。这种硬件称为**信号处理器**,由一些硬件部件(如运算器乘法器、数据存储器、控制器、接口等)组成,在其内部或在外部的可以接上专门存放程序指令的存储器。这种称为**固件(Firmware)**的程序存储器,还可由紫外光抹除和电重写入的“可抹程序存储器 EPROM”做成,所以更加灵活多用。有的信号处理器还把“模数”、“数模”变换也包含在内,可以直接用于输入和输出皆为模拟信号的场合。

对于数字信号处理工作者来说,无论采用何种实现方法,熟练使用通用计算机总是必要的。因为即使是硬件实现或信号处理器实现,其程序指令的内容总是要先在计算机上模拟、调试、修改,才能完善。

§ 1—2 数字信号处理的发展历史

离散时间信号、数字信号及其处理问题并不是近期才提出来的。数字信号处理的基本数学原理早在一个世纪之前就已经有人研究,但直到本世纪60年代之前,还一直沿用模拟信号处理的方法,仅仅在近20年,随着电子计算机技术的广泛发展(包括运算方法和数字器件集成化及大规模化的发展),数字信号处理的研究成果才蓬勃地发展起来。

我们可以从模拟信号处理的优缺点的简单分析中看出数字信号处理是如何发展起来的。

模拟处理有直观、实时的重要优点。如两个模拟信号的相加、相乘,几乎可在整个时间变量范围内即时完成。现代模拟计算机求解高阶方程的能力也是数字计算机所望尘莫及的。有一种“**混合计算机**”(Hybrid Computer),它实际上是在两台计算机(一台模拟的、一台数字的)之间设置了通信接口,因而能充分利用各自的优点,克服各自的缺点。这种计算机多用于空间技术的计算和设计等领域。

但是,模拟处理有两个重要缺点:**存储器件庞大**和**难于达到先进的技术指标**。

存储器件庞大。信号处理不仅要进行运算,还要存储信号。如滤波器处理信号后,信号波形发生变化,这本质上是由于处理设备中记忆(延迟)的存储部件的作用。滤波器的阶数愈

高,滤波效果愈好,则存储器件的数目也愈多;工作频率愈低,则模拟存储器件的体积也愈大。不过,对于数字系统,其存储记忆延迟是非常方便的,它只由延迟存取数据的过程来完成。

难于达到先进的技术指标。信号处理的技术指标,随着科学技术的发展而日益提高,模拟处理往往难于达到。例如,两个信号相乘时经常遇到模拟乘法器的动态范围问题。为了解决这个问题,预先将信号衰减,则又会引入新的误差(如衰减器噪声、相移误差、非线性误差等)。然而,在数字信号处理中,原则上只要存储器和运算器的字长足够长,就可避免动态范围问题。又如,对信号进行频谱分析时,模拟频谱仪目前在频率低端只能分析到10Hz以上,而且难于使带宽足够窄(即频率分辨力低)。但在数字的谱分析中,目前在频率低端已能做到 10^{-3} Hz的谱分析。理论上只要字长和时间许可,可以对任意低的频率进行谱分析,频带宽度也可以做到任意窄。

总之,模拟处理和数字处理各有其优缺点。近20年来,数字信号处理得到了蓬勃发展的事实,是值得重视的。目前的趋势表明,数字信号处理作为一个桥梁,正在迅速地将在各种领域的电子设备与超大规模集成技术沟通连接起来,改造着形形色色的电子设备,促进着科学技术的发展。

回顾历史可知,数字信号处理的发展是随着下列二个方面的进展而不断发展的。

算法的进展

1965年,美国IBM公司的Cooley J.W.和M.I.T.的J.W.Tukey合作,提出了计算离散傅里叶变换DFT的一种新的分解算法,并编制了能在数字电子计算机上运算的软件程序^[2]。DFT是一种早已研究过的离散信号序列的近似离散频谱,若直接计算,则运算量太大。例如对于1024个点的序列,需要做 $N^2=1024^2=1.05\times 10^6$ 次乘法,方能得出全部结果。而使用了上述分解算法之后,运算量大大减少,只需 $N\log_2 N$ 次乘法。1024个点为 $1024\times \log_2(1024)=10.24\times 10^3$ 次乘法,比直接计算法节约了近100倍的乘法次数。而且 N 愈大,节约的倍数愈大。这个算法后来被称为“快速傅里叶变换FFT”,并被人们视为数字信号处理发展史上划时代的标志。1967~1969年,美国贝尔实验室按照这个算法制成了世界上第一个数字信号处理硬件设备。后来,由于各种算法不断发展,这个算法被人们称为“基数2时间抽取算法”,或简称为“Cooley-Tukey”算法^[3]。

从1966年之后,每年都有大批算法发表出来,比较著名的有:“基数2频率抽取算法”、“组合数FFT”、“流水线FFT”、“位串行算法”、“CZT算法”、“WFTA算法”、“快速卷积算法”、“快速相关算法”、“数字滤波器的计算机辅助设计算法”、“自适应滤波算法”、“快速卡尔曼滤波算法”、“同态处理算法”、“线性预测算法”等等。正是这些层出不穷的新算法,推动着数字信号处理技术的不断发展和广泛应用。

数字器件的进展

使数字信号处理技术得以推广应用和实时处理成为现实,还要依赖数字器件的进展。数字器件的进展在很短时间里,已经历了分立器件、集成电路、大规模和超大规模集成电路几个阶段。在集成度、耗电、体积、价格、可靠性,尤其是运算速度等方面都不断地有所突破,从微处理器、位片处理器发展到信号处理器。仅信号处理器已从几年前的2920到后来的7720再到今天的320系列,发展非常迅速。现在的TMS320M10一片集成电路中,包含有32位CPU、 16×16 bit乘法器、16bit I/O接口、3 Kbyte程序存储器、288byte数据随机存取存

存储器以及一些寄存器等。它运行200ns机器周期,双向数据母线具有40Mbit/s传输率,使用起来相当方便。此外,已有不少专用的集成电路出现。如TRW公司出品的FFT单片,做32点FFT运算只须47ns的时间(若用16片实现1024点的FFT,则只须0.1ms的时间)。其它专用电路还有滤波器单片、合成语言单片,识别语言单片等。近来又发展了一种“门阵技术”,可以随时构成任意的专用集成电路。

除此之外,还出现了若干种用其它原理制成的器件,它们各有特点。例如以砷化镓为材料的器件,以约瑟夫逊原理制成的低温器件,以电荷转移原理制成的电荷耦合器件,以声表面波原理制成的声表面波器件,以静磁波原理制成的静磁波器件等。

数字器件的上述进展,已使得数字信号处理的各专业领域进入了实时处理的实际应用时代。

§ 1—3 数字信号处理的学科范围

信号处理研究用系统将信号变换为人们所希望的信号,它的内容实际上包括了处理系统和信号分析这两个紧密联系互相渗透的分支。前者如各种滤波器,处理结果仍然是时域信号;后者指各种变换器,用它分析信号得到的是各种变换域的信号参数(例如频谱),这两项内容可通称为:信号与系统。所谓“紧密联系而又互相渗透”是指具体技术而言的。例如,人们可以用滤波器组来分析频谱,也可以用傅里叶变换来实现无反馈的滤波器等。

因此,与模拟信号处理一样,数字信号处理也可分为数字系统(数字滤波器)和数字信号分析(数字谱分析)这样两个学科分支。当然,从广义上说,数字系统还应包括诸如维纳滤波器、卡尔曼滤波器等数字网络;数字信号分析还应包括诸如Welch变换分析、费马数分析等数字分析,限于本课程性质,下面只讨论狭义内容。

数字系统——数字滤波器⁽⁴⁾⁽⁵⁾

与模拟滤波器一样,数字滤波器是对数字信号在数字频域进行滤波的设备或网络。它同样有低通型、高通型、带通型和带止型四种基本型式。在这些型式中,低通型是最基本的型式,因为其它型式的数字滤波器都可以由低通型经过适当的变换设计出来。此外,还有全通型、多带型等型式。

数字滤波器原来只是对数字信号进行数字频域的滤波运算的。但如果在其前部加上“模数变换”,在其后部加上“数模变换”,它就等效为一个模拟滤波器,如图1-3所示。

图中: $x(t)$ 和 $y(t)$ 分别是输入和输出的模拟信号;

$x(n)$ 和 $y(n)$ 分别是输入和输出的数字信号;

$X(s)$ 和 $Y(s)$ 分别是 $x(t)$ 和 $y(t)$ 的拉普拉斯变换;

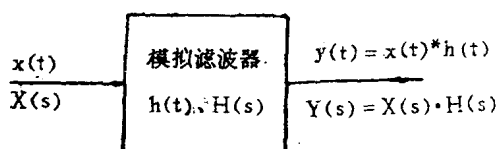
$X(z)$ 和 $Y(z)$ 分别是 $x(n)$ 和 $y(n)$ 的Z变换;

$h(t)$ 和 $h(n)$ 分别是模拟滤波器和数字滤波器的冲激响应;

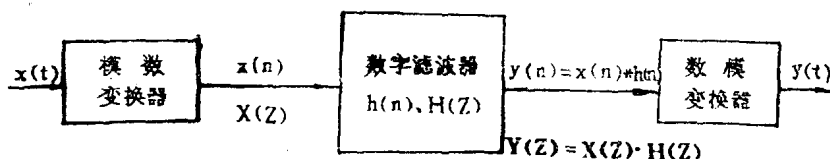
$H(s)$ 和 $H(z)$ 分别是 $h(t)$ 的拉普拉斯变换和 $h(n)$ 的Z变换。

符号 $*$ 表示模拟的卷积积分运算或数字的卷积和运算。

如同模拟滤波器的性能可由 $h(t)$ 或 $H(s)$ 来表征一样,数字滤波器的性能完全取决于 $h(n)$ 或 $H(z)$ 。因此,数字滤波器可以按照单位取样响应 $h(n)$ 的性质分为两类:(1)无限冲激响应(Infinite Impulse Response)数字滤波器,简称IIR。它的 $h(n)$ 的序列长度是



(a) 模拟滤波器



(b) 数字滤波器作为模拟滤波器使用

图 1-3 模拟滤波器与数字滤波器的关系

无限的, 即当 $n \rightarrow \infty$ 时, $h(n)$ 仍有值; (2) 有限冲激响应 (Finite Impulse Response) 数字滤波器, 简称 FIR。它的 $h(n)$ 的序列长度是有限的。

关于数字滤波器的具体内容将在第二章中详细介绍, 这里, 先指出以下四点。

(1) 数字滤波器的设计与实现, 通常按下述三个步骤进行: a. 根据不同用途, 提出数字滤波器的技术指标; b. 设计一个稳定的、因果的数学模型 $H(z)$ 来逼近所要求的技术指标; c. 设计专用的数字硬件来实现这个数学模型, 或者用通用电子计算机运行程序软件予以实现。

(2) 为满足给定的技术指标, 设计者要考虑是采用 IIR 还是采用 FIR。FIR 可具有精确的线性相频特性, 可用 FFT 实现以节省运算量, 所设计的滤波器总是稳定的。IIR 则在相同技术指标要求的条件下, 滤波器阶数低于 FIR, 时延也小于 FIR。

(3) 近年来, 数字滤波器 $H(z)$ 的设计, 可利用计算机辅助设计, 以某种准则使 $H(z)$ 最佳地逼近于指标给定的 $H(z)$ 。这种方法还可以设计出非上述四种基本类型 (如多带滤波器) 的数字滤波器, 因而得到广泛应用。

(4) 设计出数学模型 $H(z)$ 后, 在用硬件实现时, 要充分注意所用的数字硬件的有限字长对滤波器性能的影响, 如字长不足时, 会使特性变坏, 引起不稳定等。同时, 人们可由此推求出满足指标所需要的硬件字长。

数字信号分析——数字谱分析

频谱是各类信号参数中物理含义最明显的一类最基本的参数。信号用于表征各种物理现象。信号按物理现象可分为确定性信号和随机性信号两类。前者可用明确的数学表达式来描述其过去、现在和将来的值; 后者则不能预测其过去和未来的精确值。因此, 谱分析也分为确定性信号谱分析和随机性信号谱分析二类。

(1) 确定性信号谱分析。前面已经指出, 信号分析与处理系统是紧密联系、互相渗透的两个分支, 这在谱分析方法上表现为可以采用变换法和滤波器法两种方法。变换法中最简单的是用求 DFT (FFT) 法分析出离散频谱。但对于较为复杂的情况, 则必须使用如 CZT (Chirp Z Transform) 等方法。滤波器法中有滑动滤波器法 (即滤波器组法)、Chirp

滤波器法等。

(2) 随机性信号谱分析。限于本课程内容,只讨论最简单的一种随机性信号,即各态遍历的平稳过程信号。现已经证明,这种信号序列的自相关函数是确定性序列。因此,这种随机性信号的频谱,可以用自相关函数的傅里叶变换来定义,称为“功率谱密度”。上面确定性信号谱分析的方法都可用来求各态遍历平稳信号的功率谱密度。此外,还可用一种称为周期图的方法来求得实平稳信号的功率谱密度。

但是,实用上常要求对信号流的一段进行谱估计。此时,无论自相关法或周期图法都存在谱分辨率低的缺点,如果加窗进行平滑则又遇到估计精度问题。所以,对于平稳随机信号的功率谱分析,近年来提出一系列新的方法,如最大熵法、最大似然法、模型参数法等,统称为近代谱分析法。本课程将选择“模型参数法”作简单介绍。

除了上述各种谱分析方法之外,本课程还将介绍另一种信号参数,称为倒谱 (Cepstrum)。其分析方法称为同态分析 (Homomorphic Analysis)。

所有这些谱分析和信号分析的方法,已广泛应用于雷达、声纳、语言、地震、图象等信号处理领域中。

§ 1—4 数字信号处理的应用范围^{[6][7]}

自从1965年第一篇关于FFT程序的论文发表以来,数字信号处理已非常迅速地应用到各个专业领域,1978年美国MIT的奥本汉 (A.V.Oppenheim) 教授主编了一本《数字信号处理的应用》,书中总结了十三年来数字信号处理的应用情况,列举了七个方面的应用 (实际上不止这些方面,如电子仪器包括医疗仪器和生物工程仪器等方面),现简单介绍如下。

通信中的应用

通信技术实际上就是信号的传输与处理技术。通信系统中处处都有信号处理技术的应用。例如:(1)在各种编码调制技术中,差值脉冲编码调制DPCM、增量调制 ΔM 、自适应差值脉冲编码调制ADPCM、自适应增量调制ADM、自适应预测编码调制APCM等,都采用了数字信号处理技术。此外,对于通信信道的均衡补偿(如幅度与相位的均衡)、纠错码等技术也都要用到数字信号处理技术。(2)在各种通信信号的加密与解密中,“模数模加密技术”、“数字或数据信号的加密技术”、“破译密码技术”等也采用了数字信号处理技术。(3)在不同通信体制之间的转换中,时分调制(TDM)与频分调制(FDM)之间的转换等也用了数字信号处理技术。(4)在通信网络的控制与切换、通信系统的性能测试等其他方面。

声学中的应用

数字信号处理技术也应用在声音或音乐的设备中。如用于多至24个通道的、动态范围可控的、音响效果可改变的录音系统中。其次,利用数字信号处理技术实现语声和音乐信号的增强。如对已退化的唱片进行去机械噪声的处理。此外,目前已可以在微音器中加装模数变换器和在喇叭中加装数模变换器,以使电声换能器的性能得到改善。

语言中的应用^[8]

除了语言信号的编码和增强问题已在上述两个应用领域中介绍之外,目前,语言信号的

数字处理技术在下述三个方面得到应用。

(1) **语音压缩**。在传输和存储语音信号以完成通信的过程中,主要问题是在于压缩每秒语言信号所必需的**数码率**(比特/秒)。显然,数码率愈低,传输语言完成通信的效率就愈高,存储语言所需的存储器容量就愈小。尤其在现代扩展频谱通信系统中,数码率是最关键的技术指标之一。语言波形的直接数字表示(PCM)大约需要200Kbps的数码率,采用波形编码技术后,大约可降到20Kbps左右。现在如果采用语言信号的模型分析技术或其它变换技术,则可降低到2.4~0.8Kbps。语言信号的模型有**声道的斜格网络模型**(又称为线性预测参数模型)和**口腔的共振峰谐振腔模型**两种型式。最常用的语言信号非模型参数是倒谱参数。和矢量量化角标参数。将语音压缩技术用于数字通信系统的实例是所谓**声码器**(Vocoder)。这种通信系统的信源终端已付诸实用并得到显著效果。目前,有人正在研究将语言信号压缩到100~200bps数码率的方法。以汉语的讲话速度平均为5字/秒而言,这样,一片256Kbit的存储器就可以存放21分钟约6300字的语言信息。

(2) **语音合成**。这是指用机器来人工合成语言的技术。根据输入的指令要求,将语言分析的模型参数或变换参数恢复为语言,可用于自动报时、自动天气预报、仪器报警、病房护理等,甚至可用于智能机器人的执行指令后的报告(人工口)之中。市场上已售出的语言学习玩具(如Texas Ins.公司的Spell and Speak)也属于一种语言合成器。

(3) **语音识别**。如果说语音合成是一种文字输入、语音输出的**模仿人口**的设备(例如Text-to-Speech设备),那么语音识别则是一种语音输入的**模仿人耳**的设备(例如,声控打字的Speech-to-text设备)。

语音识别可分为两大类:一类是**讲话者识别**,机器可以识别或辨别某特定的讲话者并给予响应。这种讲话者个人特征的抽取与认识的技术,可用于开保险柜或保密区的锁、公安上的声纹破案、作战时对敌方驾驶员的识别等。另一类是**语言识别**,甚至是多个讲话者的语言识别。这种以抽取共同特征的语言识别技术,则可用于各种声控仪器(如声控打字机、声控机床)、智能机器人接受自然语言指令、语言翻译机等领域。即使是只允许单讲话者、有限辞汇、孤立字的语言识别器,也有很大用途。目前,人们正努力研究多讲话者、无限辞汇、自然连续语言的识别技术。

除了上述三个方面之外,目前国际上正在研究一种语言理解系统。它紧接在识别之后,从语法、句法和语义,理解所识别出的字的含意,来完成真正的智能机器人和真正的语言翻译机。

图象中的应用

图象信号不仅在电视图象,而且在医疗工程、地理地图、气象图、矿物探查、自动控制与模式识别等许多领域都得到广泛的应用。利用数字信号处理技术,采用相关法、变换法等方法,可以大大**压缩**图象信号的数码率。在混有噪声或聚焦不佳的情况下,也可以用数字信号处理技术进行**图象恢复和重构**。图象识别还可用于导弹或航天器的轨道控制,甚至智能机器人的人工眼功能的实现。

雷达及声纳中的应用

数字信号处理技术已广泛用于复杂背景噪声环境下的**信号检测**。除了过去采用的**参数检测法**(已知噪声统计特性)和**非参数检测法**(未知噪声统计特性)外,当前,所谓**Robust(稳健性)检测法**已为人们所重视。这种方法针对已知有限的噪声统计特性,能大大提高检

测的正确检测概率。数字信号处理技术还应用于天线阵或换能器基阵的设计上。

地球物理学中的应用

利用地下人工爆炸产生的地震信号及对它的数字处理,可以得到解卷积后的地震子波,分析后即可得到地球表面与内部的构造信息,用于勘查地下矿藏、测量地震等。

仪器中的应用

电子仪器领域中已出现了利用数字信号处理技术的信号源(函数发生器),它具有高稳定度、高精度、低功耗、小体积、可编程等特点。还有一种数字示波器,不但可以显示波形,而且可根据键盘输入的要求,计算并显示被测信号的各种参量。此外利用数字处理技术做成信号分析系统,可以计算并显示信号的相关函数、功率谱等参数。所谓第三代自动测试系统的个人仪器,就是仪器与信号处理的结合产物。

以上不完全地列举了数字信号处理的一些应用范围。可以预料,凡是需要信号处理和信号控制的一切领域,将都会向数字信号处理求援、并一定会得到满意的帮助。

参 考 文 献

[1] A.V.Oppenheim and R.W.Schafer, "Digital Signal Processing", Prentice-Hall Inc., 1975. (中译本《数字信号处理》,董士嘉、杨耀增译,茅于海校,科学出版社,1982年。)

[2] J.W. Cooley and J.W. Tukey, "An Algorithm for the Machine Calculation of Complex Fourier Series", Mathematics of Computation, Vol. 19, No. 90, 1965.

[3] E.O.Brigham, "The Fast Fourier Transform", Prentice-Hall Inc., 1974. (中译本《快速傅里叶变换》,柳群译 上海科技出版社,1979年。)

[4] R.W.Hamming, "Digital Filters", Prentice-Hall Inc., 1977.

[5] 邹理和,《数字滤波器》,国防工业出版社,1979年。

[6] L.R.Rabiner and B. Gold, "Theory and Applications of Digital Signal Processing", Prentice-Hall Inc., 1975. (中译本《数字信号处理的理论和应用》,史令启译 国防工业出版社,1982年。)

[7] A.V.Oppenheim Editor, "Applications of Digital Signal Processing", Prentice-Hall Inc., 1978.

[8] L.R. Rabiner and R.W. Schafer, "Digital Processing of Speech Signals", Prentice-Hall Inc., 1978. (中译本《语音信号数字处理》,朱雪龙等译,科学出版社,1983年。)

第二章 数学基础

除了高等数学和信号与系统两门课程的有关内容之外, 数字信号处理的数学基础主要是: 用数学表达式描述数字信号序列和数字系统; 对这些信号与系统进行时域分析、频域分析、复频域分析以及离散频域分析。掌握了这些基础知识之后, 就可以深入讨论数字滤波器的设计和数字谱分析。本章分离散信号与系统、Z变换和离散傅里叶变换三节来讨论。

§ 2—1 离散信号与系统

2—1—1 序列——离散时间信号

已如前面所述, 我们习惯上认为信号的变量是时间; 如果不是, 也可把信号视为时域信号来进行处理。在绪论中也曾指出, 数字信号是变量与幅值均为离散化的一种信号。但是, 如果暂不考虑幅值离散化——量化问题(这将在§ 3-4中讨论), 则可以先讨论更普遍一些的离散时间信号。

离散时间信号是一种序列, 通常定义为一系列数的集合, 即

$$x = \{x(n)\} \quad -\infty < n < \infty \quad (2-1-1)$$

式中, n 为整型变量。 $x(n)$ 表示序列中第 n 个取样值, 由于 n 是任意的, 所以这是一个普遍项。符号 $\{ \}$ 表示全部取样值的集合。应该注意, $x(n)$ 只有在 n 为整数时, 才有定义; n 为非整数时, $x(n)$ 没有定义但非为零(零也是一个确定值)。上式也可写成

$$x = \{x(-\infty), \dots, x(-1), x(0), x(1), \dots, x(\infty)\} \quad (2-1-2)$$

为了避免符号表示上的繁琐, 常用序列的普遍项 $x(n)$ 或 x_n 来表示整个序列, 而不常用 $\{x(-\infty), \dots, x(0), \dots, x(\infty)\}$ 这样的表达式。

数字信号处理中常用的序列都是一些有规则的序列。通常有如下三种:

1. 单位取样序列

$$\delta(n) = \begin{cases} 0, & n \neq 0 \\ 1, & n = 0 \end{cases} \quad (2-1-3)$$

如图 2-1 所示。它类似于模拟信号中的单位冲激信号 $\delta(t)$, 但又不完全相同。在模拟信号中 $\delta(t) \Big|_{t=0} \rightarrow \infty$, 而在这里 $\delta(n) \Big|_{n=0} = 1$,

是确定的值。

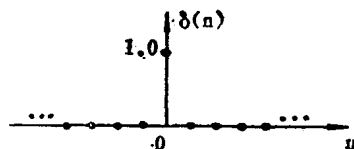


图 2-1 单位取样序列

2. 单位阶跃序列

$$u(n) = \begin{cases} 1, & n \geq 0 \\ 0, & n < 0 \end{cases} \quad (2-1-4)$$

如图 2-2 所示, 它与模拟信号中的单位阶跃信号 $u(t)$ 相同。由式 (2-1-3) 和

(2-1-4) 显然有

$$\delta(n) = u(n) - u(n-1) \quad (2-1-5)$$

3. 正弦序列

$$x(n) = A \sin(\omega_0 n + \phi) \quad (2-1-6)$$



图 2-2 单位阶跃序列

式中, A 是最大幅值, ϕ 是初始相角, ω_0 是正弦序列的数字角频率, n 是整数变量。应该注意, 由于 n 是无因次的, 所以 ω_0 的因次是弧度而不是弧度/秒。如图 2-3 所示。这种序列在周期性问题上与模拟正弦信号不同。

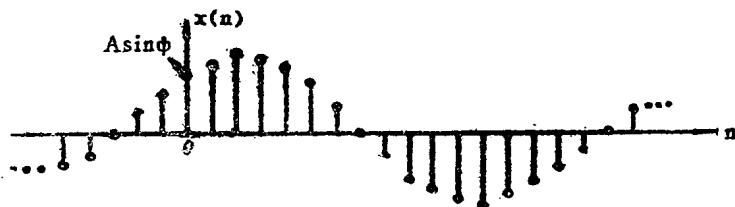


图 2-3 正弦序列

周期序列可定义如下:

$$x(n) = x(n+rN) \quad (2-1-7)$$

式中, N 为整数, 称为序列的周期, r 为整数, n 为整数变量。模拟正弦信号总是周期为 $\frac{2\pi}{\omega_0}$ 的周期信号, 这可由下式明显地看出

$$\sin \omega_0 t = \sin \left[\omega_0 \left(t + \frac{2\pi}{\omega_0} r \right) \right] = \sin(\omega_0 t + 2\pi r) \quad (2-1-8)$$

然而, 对于正弦序列, 虽然也有

$$\sin \omega_0 n = \sin \left[\omega_0 \left(n + \frac{2\pi}{\omega_0} r \right) \right] = \sin(\omega_0 n + 2\pi r) \quad (2-1-9)$$

但是, 此式只有在 $\frac{2\pi}{\omega_0}$ 为实整数时才是一个周期序列, 其周期 $N = \frac{2\pi}{\omega_0}$ 。

如果 $\frac{2\pi}{\omega_0}$ 不是实整数, 而是一个有理数, 则该正弦序列仍是一个周期序列, 但它的周期不等于 $\frac{2\pi}{\omega_0}$, 而是大于 $\frac{2\pi}{\omega_0}$ 的一个整数。例如, 设 $\frac{2\pi}{\omega_0} = \frac{8}{3}$, 则 $\omega_0 = \frac{3}{4}\pi$, 画出正弦序列 $\sin \frac{3}{4}\pi n$ 如图 2-4 所示。由图可见, 它的周期不是 $\frac{8}{3}$, 而是整数 8, 它包括了三个正弦周期波形。(以弧度表示时, 周期为 6π , 而不是 2π 。)

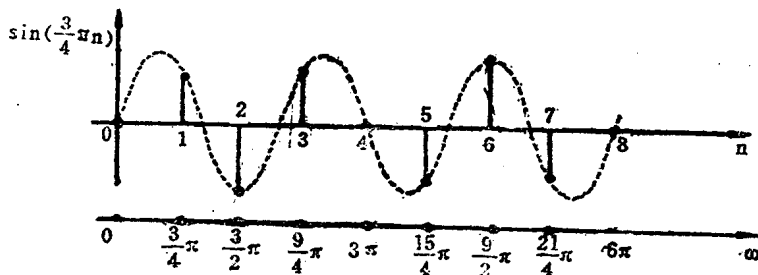


图 2-4 正弦序列的周期性