

S

SHUZI XINHAO
CHULI YUANLI YU FANGFA YANJIU

数字信号处理

原理与方法研究

刘 洋 张颖慧 那顺乌力吉 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

S

SHUZI XINHAO

CHULI YUANLI YU FANGFA YANJIU

数字信号处理

原理与方法研究

刘 洋 张颖慧 那顺乌力吉 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书共包括 10 章,主要内容有信号与数字信号处理、离散时间信号与系统、Z 变换与离散时间傅里叶变换(DTFT)、离散傅里叶变换(DFT)、快速傅里叶变换(FFT)、数字滤波器的结构与有限字长效应、IIR 数字滤波器的设计、FIR 数字滤波器的设计、多采样率数字信号处理、数字信号处理的实现。

本书理论紧扣实际、论述有据、逻辑连贯,应用内容涉及广泛、形象生动。可作为通信工程、电子信息工程、自动化、电子科学与技术、测控技术与仪器、电子信息科学与技术等专业的本科生教材,也可作为相关专业的技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理原理与方法研究/刘洋,张颖慧,那顺乌力吉编著. —北京:中国水利水电出版社,2015.4
ISBN 978-7-5170-3050-8

I. ①数… II. ①刘… ②张… ③那… III. ①数字信号处理 IV. ①TN911.72

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 058126 号

策划编辑:杨庆川 责任编辑:陈 洁 封面设计:马静静

书 名	数字信号处理原理与方法研究
作 者	刘 洋 张颖慧 那顺乌力吉 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址:www. waterpub. com. cn E-mail:mchannel@263. net(万水) sales@waterpub. com. cn
经 售	电话:(010)68367658(发行部)、82562819(万水) 北京科水图书销售中心(零售) 电话:(010)88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京鑫海胜蓝数码科技有限公司
印 刷	三河市天润建兴印务有限公司
规 格	184mm×260mm 16 开本 22 印张 535 千字
版 次	2015 年 7 月第 1 版 2015 年 7 月第 1 次印刷
印 数	0001—3000 册
定 价	76.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

随着 20 世纪 60 年代快速傅里叶变换(FFT)的出现,尤其是近年来大规模集成电路和数字信号处理器(DSP)的快速发展,数字信号处理理论和技术日益成熟,越来越广泛地应用于通信、石油勘探、医学成像、雷达和声纳、自动控制、测控技术、消费电子等领域,数字信号处理在现代科技中的地位越来越重要。在这个背景下,作者顺应社会的需要,结合自己多年的教学和科研经验,编撰了《数字信号处理原理与方法研究》一书。

数字信号处理技术的普适性是其能够广泛应用于诸多领域的主要原因,在各个领域都有其非常合适的应用背景;同时,正是由于其广泛的适应性,它已经在各个领域有很多专门的算法及技术。然而,对于初学者和从事该领域应用的科技人员而言,要想掌握不同领域内涉及的数字信号处理理论、算法和应用几乎是不可能的,也没必要。因此,本书力求将深奥理论用浅显的语言表述,按照我国读者的认知方式和文化习惯来编撰,并力求通俗、易懂和实用。在介绍基础理论和应用技术的同时,更期望可以培养读者理论联系实际的能力,启迪智慧和心灵,让读者通过学习基础理论的过程,看到科学家们解决问题所采用的方法,学会解决问题的科学策略,学会学习的方法和开发创新的能力。

本书共包括 10 章,主要内容有信号与数字信号处理、离散时间信号与系统、Z 变换与离散时间傅里叶变换(DTFT)、离散傅里叶变换(DFT)、快速傅里叶变换(FFT)、数字滤波器的结构与有限字长效应、IIR 数字滤波器的设计、FIR 数字滤波器的设计、多采样率数字信号处理、数字信号处理的实现。

本书以数字信号处理基础知识、基本理论为主线,同时将学习和应用数字信号处理的极好工具 MATLAB 引入本书。当然,即便读者之前没有学习过 MATLAB 软件的使用,也同样可以在阅读本书时一边轻松地学习数字信号处理,一边轻松地应用 MATLAB,而不必把它当作一门新课来学。

本书参考了大量相关文献和著作,在此向有关作者表示感谢。特别感谢大连理工大学邱天爽教授和清华大学胡广书教授为作者提出了许多宝贵意见。本书得到了国家自然科学基金(61362027)资助。

全书由刘洋、张颖慧、那顺乌力吉撰写,具体分工如下:

第 2 章、第 3 章、第 6 章~第 8 章:刘洋(内蒙古大学);

第 1 章、第 4 章:张颖慧(内蒙古大学);

第 5 章、第 9 章、第 10 章:那顺乌力吉(内蒙古大学)。

本书编撰过程中得到了张艺丹、邬雪阳、邱志新、刘晨燕等研究生的帮助。由于作者水平有限,书中难免有疏漏和不妥之处,敬请有关专家学者和广大读者批评指正。

作者

2015 年 1 月

目 录

前 言

第1章 绪 论	1
1.1 信号、系统与信号处理	1
1.2 数字信号处理的特点及系统结构	6
1.3 数字信号处理的发展过程及前景分析	8
1.4 数字信号处理的应用领域	10
1.5 如何使用数字信号处理	28
第2章 离散时间信号与系统	33
2.1 离散时间信号	33
2.2 离散时间系统	62
2.3 常系数线性差分方程	79
2.4 信号的数字化处理方法	88
2.5 系统的频率响应	96
第3章 Z 变换	102
3.1 Z 变换与收敛域	102
3.2 Z 反变换	105
3.3 Z 变换与傅里叶变换的关系	110
3.4 利用 Z 变换求解差分方程	112
3.5 离散时间傅里叶变换(DTFT)	113
第4章 离散傅里叶变换(DFT)	127
4.1 傅里叶变换的形式	127
4.2 周期序列的离散傅里叶级数(DFS)	129
4.3 离散傅里叶变换(DFT)	137
4.4 DFT 的应用	142
4.5 二维离散傅里叶变换	160
第5章 快速傅里叶变换(FFT)	163
5.1 直接计算离散傅里叶变换的计算复杂度	163

5.2	按时间抽选的基-2 FFT 算法(库利-图基算法)	164
5.3	按频率抽选的基-2 FFT 算法(桑德-图基算法)	170
5.4	离散傅里叶反变换(IDFT)的高效算法	174
5.5	实序列的 FFT 算法	176
5.6	分裂基 FFT 算法	178
5.7	N 为复合数的 FFT 算法	182
5.8	线性调频 Z 变换(Chirp- Z 变换或 CZT)算法	186
5.9	FFT 的应用	191
第 6 章	数字滤波器的结构与有限字长效应	192
6.1	数字滤波器的基本概念与技术指标	192
6.2	数字滤波器的研究与表示方法	195
6.3	无限长单位冲激响应(IIR)滤波器的基本结构	204
6.4	有限长单位冲激响应(FIR)滤波器的基本结构	209
6.5	数字滤波器的格型结构	214
6.6	数字滤波器实现中的有限字长效应	223
第 7 章	IIR 数字滤波器的设计	231
7.1	模拟滤波器的设计	231
7.2	IIR 数字滤波器的间接设计方法	249
7.3	IIR 数字滤波器的频率变换及 MATLAB 实现	250
7.4	IIR 数字滤波器的直接设计方法	253
7.5	IIR 数字滤波器的相位均衡	256
第 8 章	FIR 数字滤波器的设计	259
8.1	线性相位 FIR 数字滤波器	259
8.2	窗函数法 FIR 数字滤波器设计	271
8.3	频率采样法 FIR 数字滤波器设计	290
8.4	线性相位 FIR 滤波器设计的最优方法(等波纹逼近法)	298
8.5	简单整系数法设计 FIR 数字滤波器	302
8.6	FIR 和 IIR 数字滤波器的比较	306
第 9 章	多采样率数字信号处理	307
9.1	多采样率的概念	307
9.2	序列的整数倍抽取和插值	307
9.3	有理倍数采样率转换	313
9.4	多采样转换滤波器的设计及实现	315

第 10 章 数字信号处理的实现	323
10.1 数字信号处理的实现方法	323
10.2 数字信号处理器的速度	324
10.3 数字信号处理的误差	330
10.4 数字信号处理的应用	335
参考文献	343

第 1 章 绪论

1.1 信号、系统与信号处理

1.1.1 信号

信号是信息的一种物理体现,是信息的载体。信号可以是多种多样的,如根据载体的不同,信号可以是电的、磁的、光的、声的、机械的、热的等。从广泛的意义来看,信号是指事物运动变化的表现形式,它代表事物运动变化的特征。在电子学中,信号就是指电流或电压,它们是由传感器将事物的变化转变为与这些变化有对应关系的电量。传感器也叫变换器、换能器或探测器。在化学中,信号是指物质的比例、物质变化的条件、物质的分子结构等,是人们通过观察、测量和记录所得到的反映物质性质的数据。在地理学中,信号是指反映地形面貌,如形状、距离、高度,以及矿产资源分布,大气压力、湿度等的的数据。在经济学中,信号是人类生产和生活状况的统计,如工农业生产的产量和增长量,货币的分布、流向和流量等,这些数据反映社会的经济状况和经济发展的规律,依此能够预测社会可持续发展的时间。在医学中,信号是指人体生理变化的指标,如体温、血压、身体新陈代谢的速度和组织结构等。在语言学中,信号是作家创作的结果,如文字的排列、文字的数量、文章的篇数和书籍的发行量等。

但在各种信号中,电信号是最便于传输、处理和重视的,因此也是应用最广泛的,人们一般把信号转变成电的形式,这样做方便信号传输、存储,还有利于机器处理和控制。这是人类文明的重要特征,人类善于将机器能做的事尽量让机器做,使自己有更多的时间和力气去做其他的事情,因此对电信号的研究具有普遍的意义。

信号以某种函数的形式传递信息。这个函数可以是时间域、频率域或其他域。但最基础的域是时域。时域信号 $s(t)$,其自变量 t 可以是连续的和离散的两种形式,其函数值(幅度)也有连续和离散(量化)两种形式。两者共有 4 种可能的组合,但常用的是其中的 3 种:模拟信号、离散时间信号和数字信号。

(1) 模拟信号

模拟信号也称连续时间信号。信号 $x(t)$ 的自变量 t 和函数值 $x(t)$ 都是连续变化的。例如,温度计上指示温度的红色线段,当时间从某一时刻连续地过渡到另一时刻,红色线段的端点始终随着温度连续地从面板上某个刻度过渡到另一个刻度,红色端点指示的是温度信号。这种时间是连续的和物理量也是连续的信号称为连续信号或模拟信号(analog signal)。若用坐标来描述温度的变化,那么横坐标的时间是连续变量,纵坐标的温度也是连续变量,温度随时间变化的坐标图是一条连续的曲线。

(2) 离散时间信号

信号 $x(nT)$ 的自变量 nT 是时域的离散采样点,而函数值是连续变化的。扩大到一般情

况,可用 $x(n)$ 代表时间离散、幅值连续的任何序列。此处的 n 仅表示顺序号,可以是时间轴顺序,也可以是其他任何某个域、某种轴上的序号。

如果在早上、中午、晚上和半夜四个时刻观察温度的变化,其他时间不观察温度,这种方法观察的温度信号的时间是不连续的、物理量是连续的;这种时间是离散的和物理量是连续的信号称为离散时间信号(discrete-time signal),简称离散信号。

(3) 数字信号

信号 $x_q(n)$ 在时间和幅值上都是离散的,或数字信号就是幅度量化了的离散时间信号。若是在一天的四个时刻观测温度,并用笔和纸记录温度的变化,这种方法记录的温度信号的时间和温度都是不连续的或离散的;这种时间和物理量都是离散的信号叫做数字信号(digital signal)。温度计上的信号是连续信号,实际记录的信号是数字信号,原因是人的观测时间和能力有限、记录数字的长度不可能很长或精度不可能很高,而且也没必要。

观察一年的温度变化时,可以用温度是连续信号的方式,也可以用温度是数字信号的方式。请读者自己想想,用温度是连续信号的方式,有没有必要? 麻烦不麻烦? 一般来说,长时间观察温度这种变化缓慢的物理量,用数字信号的方式就足够了,况且一年当中温度的变化范围不大。

信号无处不在。通过对事物的运动变化现象的观察、采集、测量、记录等可以获得信号。获得信号的方法主要有三种:人工观测、特殊装置和传感器。

人工观测是通过人眼观看将物理量用数字的形式保存下来。例如,考试成绩的评定、商品交易的记录、河水水位的测量记录、空气质量的检测记录、食品成分的分析记录等。

特殊装置是利用材料的物理性能制作的设备,它能连续地表现物理量的变化。例如,温度计、风向仪、指南针、水银血压表、气压表、电阻表等。

传感器是将被测物理量或化学量转换成与之对应的电量的电路或器件。例如,传声器(俗称麦克风、话筒)、电视摄像头、光敏二极管、压电陶瓷等。

1.1.2 系统

系统定义为处理(或变换)信号的物理设备,或者说,凡是能将信号加以变换以达到人们要求的各种设备都称为系统。按照所处理的信号分类,也将系统分为 3 类。

①模拟系统。处理模拟信号的系统,即系统的输入、输出均为模拟信号。通常由电容、电感、电阻、半导体器件以及模拟集成电路组成的网络和设备是模拟系统。

②离散时间系统。处理离散时间信号的系统,即系统的输入、输出均为离散时间信号。比如用电荷耦合器件(CCD)以及开关电容网络组成的系统。

③数字系统。处理数字信号的系统,即系统的输入、输出均为数字信号。由数字运算单元、存储单元、逻辑控制单元以及 CPU 等组成的系统都是数字系统。

1.1.3 信号处理

处理(process)是指人们为了某种目的,用工具对事物进行一系列操作,改变事物的位置、形状、性质和功能。铁匠为了改变铁块的硬度和韧性,把烧红的铁块投入水中或油中,这是热处理。秘书对校长的信件所述的事情进行安排或解决,称为处理信件或信件处理。商店便宜

卖掉不想要的商品称为处理商品。人们清除家里不要的纸箱、纸张和瓶子叫做处理废品。

所谓信号处理即是用系统对信号进行某种加工,包括滤波、分析、变换、谱分析、参数估计、综合、压缩、估计、识别等。如收集信号、分析信号、消除没用的信号、改变信号的形式、传输信号、辨别信号的身份、确定信号的传输时间、显示信号、存储信号等。

有些信号处理的速度是要求按照信号的实际变化时间进行,这种信号处理称为实时(real time)信号处理,它对机器的速度要求较高。

不管采用什么方法,为了让计算机能够完成信号处理的工作,被处理的信号必须是数字信号。所以,需要数值计算的时候,模拟信号都要转变成数字信号。

数字(digit)在一般人的概念中和习惯中是由 0~9 组成的数,用数字来表示的信号只能表示信号在不同时刻的大小。例如对图 1-1 所示的电压信号 $v(t)$,若用数字表示这个信号的话,它只能是时间 t 的一个个时刻所对应的一组电压 $v(t)$ 的数值。当然,时刻之间的间隔越密,数字所表示的电压变化就越接近真实情况;还有,表示信号大小的数字的位数越多,数字与 $v(t)$ 的真实值就越接近。

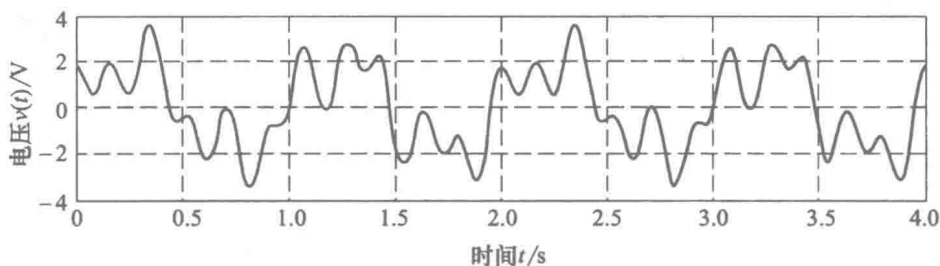


图 1-1 电压信号的波形

实际应用中,时间间隔越密和数字位数越多并不一定是件好事。要求生活中任何事情都完全真实再现是不可能的,也是没意义的。

用电路的方式来表示数字信号时,常见的有十进制的方法和二进制的方法。十进制(decimal)的方法要求电路有 10 种状态对应 10 个基本的数字符号,这对电压、电流等的大小划分十分苛刻,而且电路很难判断这种电压或电流是否受到干扰,也很难抵抗这种电压或电流受到的干扰。二进制(binary)的方法要求电路有两种状态对应两个基本的数字符号,这只需要将电压、电流等的大小划分为高和低两种状态,电路很容易判断这种电压或电流是否受到干扰,也容易消除这种电压或电流受到的干扰。所以,用机器或用电路的方式来表示信号或者处理信号,跟人在这方面的习惯是不同的。例如,计算机的数据、命令和工作过程都是由 0 和 1 组成,它们可以是电压的高低电平、磁带上的正反磁场、光碟面的凹凸状态等。符号 0 和 1 代表两种相反的状态,外界和内部的各种不稳定因素的影响只要不超过两种状态的中间界限,是不容易改变二进制数字的。

二进制数字信号的指标中经常用比特(bit)来描述信号数值的位数或长度。严格地讲,数字信号处理学科中所讲的信号都是用二进制表示的。为了方便理解和观看,人们在理论学习和研究中还是用熟悉的十进制表示法,因此在学习数字信号处理的理论时,暂时不考虑数字信号与真实信号之间的数值差距,也不考虑运算带来的误差,而是把数字信号看成离散信号。

数字信号处理——凡是利用数字计算机或专用数字硬件、对数字信号所进行的一切变换

或按预定规则所进行的一切加工处理运算。例如：滤波、检测、参数提取、频谱分析等。或者说数字信号处理是用数值计算的方法，完成对信号的处理。它的英文原名叫 digital signal processing, 简称 DSP。另外，DSP 也是 digital signal processor 的简称，即数字信号处理器，它是一种专用集成电路芯片，只有一枚硬币那么大。有时，人们也将 DSP 看作是一门应用技术，称为“DSP 技术与应用”。

图 1-2 就是一个简单的数字滤波器，由一个加法器、一个延时器和一个乘法器组成。因此处理的实质是“运算”，运算的基本单元是延时器、加法器和乘法器。

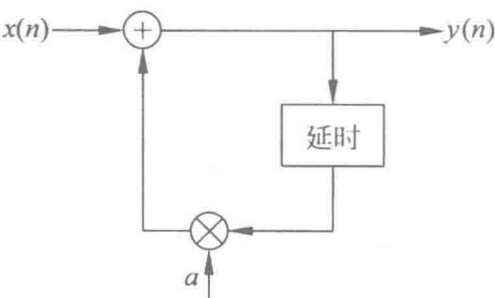


图 1-2 简单的数字滤波器方框图

从技术观点看，信号处理有两种基本方法：一是滤波，滤除信号中不需要的分量，例如在单边带通信系统中，应用滤波的方法抑制带外的频率分量；二是分析或变换，对信号进行各种方法的分析，估计某些特征参数，或者用变换方法对信号进行频谱分析，从而确定信号中有效信息的分布。

数字信号处理也就是信号的数字处理，它的专业含义是用计算机对二进制数表示的具有物理、社会、医学、经济等实际含义的信号，进行一系列的数学计算操作，实现人们的要求。数字信号处理是外来词，它的英文原名是 digital signal processing, 直接翻译成中文就是数字信号处理，说起来也比较顺口。数字信号处理是这么一门学科，它介绍怎样用数字表示信号，怎样用数学描述信号处理，怎么处理信号最快、最经济和最安全。

例如有一个电压信号

$$v(t) = 2\sin(2\pi t) + \sin(6\pi t + 1) + \sin(11\pi t + 2) \tag{1-1}$$

它的波形如图 1-1 所示，需要将它存储在磁带上。存储的方法有多种：第一种是直接将它存储在磁带上；第二种是间隔一定时间测量它一次再将测量结果存在磁带上；第三种是将间隔测量的信号变成二进制数再存在磁带上；第四种是将该信号的基本成分计算出来再保存在磁带上。前三种方法比较简单，但不属于数字信号处理；第四种方法比较复杂，因为人们或机器不可能知道收到的信号具有什么特征，要用科学的方法才能知道信号的基本成分。选择信号的基本成分通常是根据人们的需要来决定的，其准则是基本成分的数量尽可能地少、并且能解决实际问题。例如，式(1-1)的电压信号，将其基本成分看作是正弦波是比较合适的，因为每个正弦波只需要幅度、频率和初始相位三个参数就可以表示。第四种方法需要数字计算，所以它属于数字信号处理。它只要 9 个数字就可以将一个较长时间的信号保存下来，可以极大地节省存储材料磁带。在需要恢复这个信号 $v(t)$ 时，只要将存储的数据做与存储前的相反的运算，就可以恢复原来的信号。

又例如,一张磁悬浮列车车厢的照片,如图 1-3 所示,由于保存不慎,照片受潮发霉,图像受到损坏,如图 1-4 所示。修复这张照片的办法有多种:第一种是手工用钢笔对它修复;第二种是用毛笔模仿原始照片画一张;第三种是重新拍照一次;第四种是把照片看成是由许多小点组成的,把每个点的浓淡变成数字信号并对这些点信号做某种处理,构成一幅新的图画。前三种办法比较简单,有耐心就基本可以做到,但效果并不很好,它们不属于数字信号处理。第四种办法比较复杂,因为一幅图像是由点组成的,一幅图像的点有非常之多,需要计算机才能完成处理,属于数字信号处理。第四种办法还可以再分成几种方法,比方说:①把原来图像的每一点与其周边的点按它们的数值大小由小到大排列,然后取它们的中间值作为一个新的点,这样可以构成一幅新的图像;②把原来图像的每一点与其周边的点的数值平均,然后取平均值构成一幅新的图像;③把原来图像的每一点与其周边的点的数值中的最大值和最小值去掉,然后取它们的平均值构成一幅新的图像。图 1-5 是采用中间值的处理方法修复的照片,它的每个点都是对图 1-4 取中间值的结果,运算量巨大;虽然修复后的照片与原来的照片相比没那么清晰,但它的效果比手工修复的要好。

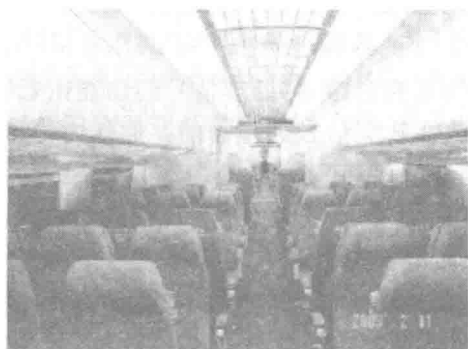


图 1-3 磁悬浮列车车厢的原始照片



图 1-4 原始照片受潮发霉

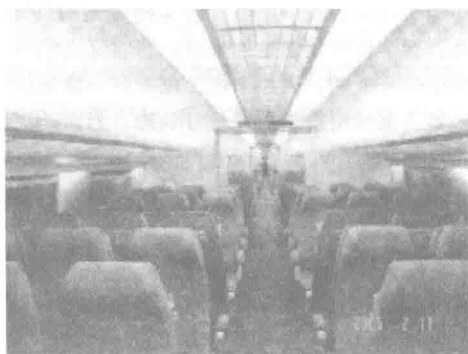


图 1-5 用中间值的方法修复受潮发霉的照片

通用计算机(general-purpose computer),如台式计算机和笔记本计算机,它们可以精确地进行数字信号处理,但它们体积大、价格贵、耗电量大等缺点限制了它们在小型设备中的应用。针对数字信号处理的特点制作一种专用计算机,并把它做成一小片集成电路,就得到现在常说的 DSP 芯片。DSP 芯片比通用计算机的体积小、功耗低、价格便宜,便宜的每片约 5 美

元,容易植入需要进行稳定、复杂和智能化工作的信号处理器。

1.2 数字信号处理的特点及系统结构

1.2.1 数字信号处理的特点

数字信号处理在发达国家从 1980 年开始成为了热门学科。随着计算机的普及,数字信号处理学科也快速在我国高校建立。数字信号处理的特点表现在以下几个方面。

(1)处理精度高

对于数字信号处理系统来说,它的精度是由数字的字长(或叫单位比特数、单位长度)决定的,提高字长就可以提高信号处理的精度。常用的字长有 16 位和 32 位,它们可以达到 $1/2^{16}$ 和 $1/2^{32}$ 的精度。实际上,为了经济实惠,精度达到要求就可以了。而在模拟电路中,提高元器件的精度是比较困难的,因为它受到生产条件和使用环境的限制,一般模拟电路能达到 $1/100$ 的精度就不错了。

(2)改变功能灵活

数字信号处理器采用专用的集成电路或可编程的集成电路,它处理信号的功能由数学方程的系数和计算机的程序决定。这些系数和程序存放在数字信号处理器的存储器内,只要改变存放的系数和程序,就可以改变数字信号处理器的功能,而不用改变处理器的电路结构。这个特点非常方便使用者,特别是在军事上,为了防止敌方了解我方的通信情况或防止我方通信频率被敌方干扰、不能工作,需要经常改变通信方式、改变处理信号的方式,避免一成不变的被动挨打局面。在模拟电路中,若要小改变系统的处理信号功能,就要把电路板上的元器件拆下再换上另外的元器件;若要大改变系统的处理信号功能,就要丢掉整个电路板。

(3)性能稳定

数字信号处理器的数字状态是由高电平和低电平两种状态组成,元器件的误差很难影响这种数字的工作,环境的电磁场、温度、湿度、气压、振动、噪声、时间、电路板等因素也很难影响这种数字的工作;所以,用不同元器件制作的数字产品,很容易达到相同的技术指标。例如,采用不同的数字信号处理器,或多次复制信号都不会出现信号质量的衰减。还有,数字信号处理器是用大规模集成电路技术制作的,工艺一致的制作方法使得芯片的成品率高,自然,用这种芯片制作的产品其故障率就低。而模拟电路是由许多分立元器件组成的,各种元器件的不同制作方法和自身的误差的互相影响使得电路的成品率低,自然,用这种元器件制作的产品其故障率就高。

(4)效率高

对于变化比较慢的信号,数字信号处理器可以利用处理完一个信号样本的空余时间去处理另外的信号,达到一个数字信号处理器可以同时处理多个信号的效果。数字信号处理器的计算速度越高,它处理信号的效率就越高,当然还要有优秀的计算方法相配合。利用集成电路技术的优势,可以制作出更小尺寸、更低价格、更低功率损耗和更高计算速度的数字信号处理器芯片。

(5)制作成本低

同一型号的数字信号处理器芯片是结构一样的集成电路,而它最后形成产品的功能则是

由工程师给芯片加入的程序所决定。所以,数字信号处理器芯片就像是通用元器件,可以进行大批量生产。还有,数字信号处理器的电路工作在饱和、截止两种状态,也就是低电平和高电平,对电路参数的要求不高,因此产品的合格率高。芯片的一致性好,生产过程相对简单,也是合格率高的一個原因。另外,在遥感测量或地震波分析中,被处理的信号的频率较低,过滤这些几赫兹或几十赫兹的信号,若用模拟电路处理,要求电感、电容的数值很大,这就需要增加电感、电容元件的体积,而体积容易受温度和压力的影响,导致很难获得准确的频率选择性。若用数字信号处理,由于数字信号处理器是一块芯片,它的体积小、重量轻、耗电少,相对模拟电路来说,可以极大地节省原材料、节约能源、节约资源。这些因素极大地降低了数字信号处理器芯片的制作成本。

(6)功能强大

对于要处理的问题,只要能把它们转化为数学表达式,把它们编写为程序、存入数字信号处理器的存储器,数字信号处理器就能完成这种处理任务。数字信号、程序都可以存储在电路、光盘或磁盘上,方便传输,也方便处理。相对来说,模拟电路只能做些较简单的放大、相加等处理工作。若用模拟电路执行复杂的数学表达式,由于受到模拟电路自身特点的限制,如各级电路的工作电流互相影响、电路各部分的参数互相影响、环境温度湿度气压的影响、外来电波的影响、元器件制作工艺的限制等,它是不能很好地完成这种任务的。

(7)学习和研制的门槛高

这大概就是数字信号处理的弱点。从教学上来说,数字信号处理是一门面向应用的数学理论学科,涉及人们熟悉的时间领域和人们陌生的频率领域;实现数字信号处理的数字信号处理器是一种面向应用的技术,涉及数字计算机结构和编写程序技巧。学好两门课才能较好地应用数字信号处理。还有,设计数字信号处理器的程序需要专门的软件开发和调试设备,这项投资比较大;设计数字信号处理系统需要较长的时间。相对来说,对于模拟电路,无线电爱好者通过学习部分模拟电子技术知识,就可以用电子元器件做些小产品,投资较小。

1.2.2 数字信号处理的系统结构

大部分信号的最初形态是人们常见的事物形态,为了测量和处理它们,常用传感器把它们的特征转换成电信号,等到这些电信号处理完后再把它们转变为人类能看见、能听见或能利用的形态。所以数字信号处理的全过程或数字信号处理系统一般由七个单元组成,如图1-6所示,其中数字信号处理单元是必需的,其他单元可以根据实际需要取舍。



图 1-6 数字信号处理系统

例如,机密房间的保安门锁系统,进入该房间的人必须先说一句话,让保安门锁系统处理说话人的语音信号。如果保安门锁系统采用数字信号处理系统,则它的第1单元是信号转换,

用传声器把声音信号转换成电信号。第2单元是低通滤波,它用电阻电容电路滤掉语音信号中没用的高频成分,防止采样信号时出现失真。第3单元是模—数转换,它对滤波后的信号采样,并将采样信号变换成二进制的数字信号。第4单元是数字信号处理,它把输入的语音数字信号与以前记录的语音数字信号进行比较,确认来访者是否有资格进入机密房间,如果有资格则打开房门和致欢迎词;如果没有资格则不开房门和致提醒词。控制房门的电路由数字信号处理器输出的信号直接启动,不需要系统的后面三个单元。欢迎词和提醒词语音信号由数字信号处理器的存储器提供,它们是事先存储的二进制信号,送往第5单元。第5单元是数—模转换,它将数字信号变成模拟信号。由于数字信号是时间离散、幅度也离散的,在时间的各个采样间隔点上,恢复的模拟信号幅度存在跳变,与自然的语音信号有一定的差别;也就是说,数—模转换得到的模拟信号存在许多没用的高频成分。第6单元是低通滤波,它的职责是完善数—模转换,使恢复的模拟信号的变化更加流畅。第7单元是信号转换,它用功率放大器和扬声器将电信号变为声音。

值得说明的是:在保安门锁系统中,产生语音是不需要前面三个单元的;第4单元的数字信号处理把输入的语音数字信号与以前录下的语音数字信号进行比较,比较的方法有很多种,这就是“数字信号处理”这门理论研究的内容。

1.3 数字信号处理的发展过程及前景分析

1.3.1 数字信号处理的发展过程

数字信号处理是从20世纪60年代以来,随着信息学科和计算机学科的高速发展而迅速发展起来的一门学科,其重要性日益在各个领域的应用中表现出来。

早期处理信号的方法是把物理信号转换成电信号,用电子管电路或电子电路,即真空电子管、晶体管、电阻、电容等组成的电路,对电信号做有线传递、无线发射、放大、信号产生、滤波、调制、检波、变频、比较等加工处理。这里被处理的信号的特点是,信号任何时刻都有一个电压值或电流值对应物理量的大小,即信号在连续时间和连续电量上都有意义。这种信号称为连续信号或模拟信号,处理连续信号的机器(一般称电路)叫模拟电路。

随着需要处理的信号的增加和对信号处理要求的提高,如物理状态的判断、电话通路的转换、人的身份识别、机器的自动化控制、数据的保存、数据的提取等,模拟电路已经不能胜任这种工作。

1948年C. E. Shannon以题为“通信的数学理论”(A Mathematical Theory of Communication)的论文奠定了经典信息论的基础。从数学的观点来看,信息论包括信息源的数学结构、作为信息量的熵理论、信道理论和编码理论等。概率统计理论和代数方法是信息论发展的主要数学工具。Shannon和之后的Kolmogorov就系统的不确定性或信息所定义的Shannon熵和Kolmogorov-Sinai熵成为信息技术中最重要的一个度量。

在这种情况下,数字电路应运而生。数字电路是一种开关电路,每个开关只有导通和截止两种状态。从数字电路的工作过程来看,输入输出体现一种因果关系,好像数字电路能对输入信号做逻辑判断一样,所以数字电路也叫逻辑电路。数字电路是由用晶体管、电阻和电容做成

的逻辑门组成的,逻辑门有与门、或门、非门、与非门、或非门等。数字电路最基本的信号处理是对信号做数字比较、逻辑判断、加减乘除运算、编码译码、移位、数据选择、存储、信号产生、分频、开关控制、计数、码组变换等。

数字电路处理的信号可以是连续时间信号(continuous-time signal),它的时间连续但幅度不连续,信号的大小用0和1两种基本状态组成的二进制数表示。数字电路处理的信号也可以是时间离散和幅度离散的数字信号。这些信号许多是从模拟信号转换过来的,它们一般是变化较慢的物理量,如炼钢炉的温度、空气的压力、温室的湿度、汽车的速度、货物的重量、水库的水位、植物的高度等,对它们的测量没必要连续进行。一般数字电路对这些物理量判断后做出相应的控制,这种处理速度也没必要像电波速度那么快,在数字电路刚诞生的年代也不可能有很快速度的数字电路。

第二次世界大战以后,随着计算机和微电子学的飞速发展,科技界的技术革命反映从经典信息论到现代信息理论的转变。从模拟量到数字量的转换加速了这一转变过程,信息技术在人们面前展示了一个广阔的、内容丰富的研究和应用领域。

微电子技术和计算机技术的发展为数字信号处理提供了必要的物质基础。库利(J. W. Cooley)和图基(J. W. Tukey)在1965年发明了一种快速傅里叶变换算法(FFT),它的出现使数字信号处理的速度提高了几个数量级,开创了数字信号处理的新时代。

在大规模集成电路技术以及处理算法的进一步发展和推动下,数字信号处理得到了迅猛发展和广泛应用,也让人们对信号处理提出更高的要求。例如,不改变电路的结构就可以改变电路的功能,用计算机代替模拟电路的工作,提高机器的性能而不淘汰机器本身,把语音转换成文字,提高电视通信的信号质量,无损伤地测量人体微血管中红细胞的运动速度,不拆机地检查机器的好坏等。这些处理信号的要求往往要用复杂的数学公式才能表达,而且这些信号的处理速度往往也要求很快,侧重逻辑判断的数字电路是难以胜任这种要求和速度的。数字信号处理电路正是为这些高要求和高速度而设计的专门电路,也叫数字信号处理器芯片、数字信号处理器、DSP芯片或DSP,它极大地提高了信号实时处理能力,是数字信号处理技术发展的又一个里程碑。

DSP可以用专门的数字电路根据数字信号处理的数学公式或数字信号处理的原理图组装得到,也可以做成可执行程序的数字集成电路。当然通用计算机也可以完成数字信号处理的工作,特别是在学习和实验阶段,使用通用计算机做数字信号处理既简单又方便。但是在应用阶段,通用计算机就不合适了,因为它的体积相对一块芯片来说太大,成本太高,耗电也太多。用通用计算机来做便携式机器更不可能,比如汽车防撞雷达、导弹、地质勘探仪、电吉他、手机、数码相机等。所以数字信号处理器一般是指专门做数字计算的、计算速度很快的芯片。数字信号处理器的处理速度很快,可以快速处理数字信号,也可以快速地处理模拟信号;处理模拟信号时应先将模拟信号变换成数字信号,待信号数字处理完毕再转换回模拟信号。

目前,数字信号处理的应用遍及雷达和声呐的目标检测、语言合成、数字音乐、电站的状态监测系统、飞行器的故障诊断、脑电图(EEG)机、核磁共振装置等,这些应用反映了数字处理技术的强大功能和重要应用意义。在非工程技术领域中,如金融活动,人们也在尝试使用数字信号处理从数据库的海量数据中挖掘和发现所希望获得的知识。数字信号处理影响了通信、语言处理、多媒体、运输、声学、生物医学等一系列领域,从而深深地进入人们的现代生活之中。

1.3.2 数字信号处理的前景分析

数字信号处理有许多的优点。随着计算机技术和微电子技术的进步,数字信号处理得到迅速发展,同时也推动各行各业的发展。

手机的普及使用就是一个范例。刚开始时手机是一个非常昂贵的商品,现在已成了一个普通的商品。手机在促进信息产业和它的相关配件产业迅速发展的同时,还增加了人们之间的联系、增加信息的流通。手机可以减少许多社会实践和生活的不方便,减少许多不必要的事情,使人们少走冤枉路、少办冤枉事,降低物资消耗、提高工作效率。

人们处理的事情越多、要求越高,就越需要深入了解事物变化的规律,并充分利用事物变化的本质。怎么了解和利用呢?这就需要对代表事物变化的信号进行分析和处理,需要数字信号处理。因为,数字信号处理具有功能多、应用广泛、使用灵活等优点,它能为科学处理信号、处理事务等方面提供优秀的理论,为制造业提供良好的生产机会,为社会活动提供科学的工作方式。

数字信号处理不仅能够科学地处理信号、准确地处理信号,能节省制造信号处理设备的原材料,能提高生产力、提高人们的工作效率,而且还能节约人类消耗的能源、合理地利用地球的资源,其应用前景宽广,意义深远。

1.4 数字信号处理的应用领域

数字信号处理的应用领域非常广泛,它涉及通信、电子仪器、自动控制、语音和声音处理、图形和图像处理、军事、工业、生物医学、社会管理、金融证券、地球物理、航海、航空航天、家用电器、广播电视等领域。小到分子电子,大到天文地理,只要能用数学来描述的问题,都可以用数字信号处理来解决。

1.4.1 通信领域

在通信领域,数字信号处理可以应用在光纤通信、蜂窝式移动电话、语音编码、互联网通信、信号调制、信号解调、多路复用、多路径均衡、信号分离、调制解调器、数字滤波、信号预测、信道识别、信道均衡补偿、自适应滤波、数据加密、跳频保密通信、数据压缩、数字通信、回声抵消、压扩处理、抖动、传真、扩展频谱通信、纠错编码、可视电话、电视会议、雷达、软件无线电、直播卫星技术、网络技术等方面。下面详细介绍数据压缩、回声抵消和压扩处理的应用。

(1) 数据压缩

当信号需要从一个地方传到另一个地方时,模拟电路的通信方式是将声音信号变成电信号,直接调制高频载波进行无线电通信,接收机将收到的高频信号解调后还原为声音信号。它的特点是简单直接,一套设备一次只能传送一路信号。若一套设备同时能让越多的人使用则该设备的利用率就越高,若一套设备传送一段语言所用的时间越短则该设备的效率越高。如果能够把声音信号从时间上分段,找出每段信号的基本成分的参数,通信时只是传送这些参数,这样就能极大地减少传送的数字。基本成分的参数就好像食品标明的配料或营养成分,接