

第 1 章 引 言

数字信号处理 (DSP, Digital Signal Processing) 是指利用计算机或专用数字信号处理设备, 采用数字的方式对信号进行表示和处理 (如滤波、谱分析、检测与估计、识别、调制和解调等) 的一种技术。其思想来源于数值计算方法, 而其发展及成型则得益于超大规模集成电路和数字计算机的发明和发展。目前 DSP 已经成为一门独立的学科。

下面, 先简单回顾信号和信号处理的基本概念, 再介绍数字信号处理的特点和应用。

1. 信号和信号处理

自古以来, 人与人之间、人与自然之间、自然与自然之间无时无刻不在进行信息交流, 这些交流的信息都可以称为信号。而为了描述和评价这些信息的价值性、保密性以及时空有效性等特点, 人类发明了声、光、电、文字、图画等种种物理的或其他的手段以进行演示。

此外伴随着数的产生, 人们开始用数学的方式来描述和表示信息, 并通过各种数学计算方法对信息加以分析、归纳和总结, 从而更好地使用这些信息并产生了现代意义上的信号及信号处理概念。也就是: 信号是独立变量的函数。狭义的信号是以时间为自变量的幅度函数。

如果信号的自变量连续, 则称为连续时间信号 (简称连续信号); 若信号的时间连续、且函数值 (幅度) 也连续, 则称为模拟信号; 而时间离散、幅度连续的信号, 称为离散时间信号 (简称离散信号); 当信号的时间离散、幅度也离散时, 称为数字信号。

信号处理是对信号进行某种加工 (数学计算), 其目的是为了提取信号携带的有用信息。信号处理的方法取决于信号的类型以及信号中信息的性质。粗略地说, 信号处理涉及信号的数学表示以及为提取信息所执行的算法。比如, 信号可以用以时间作为自变量的时间函数表示 (时域表示), 也可用以频率作为自变量的频谱函数表示 (频域表示), 因而信号处理可以在时域进行, 也可以在频域进行。

根据信号处理的预期目标, 信号处理可分为: 滤波、分析、变换、调制解调、参数估计和识别、压缩等。滤波是最经典的信号处理方法, 用于消弱信号中的多余分量、滤除混杂的干扰和噪声; 分析则是为了对信号进一步的使用而对信号的各种特征进行细致的归纳总结, 如信号的频谱分析等; 变换则是将信号变换成易于传输、分析或识别的形式, 以利于后续的处理; 调制解调是实现信号传输的一种技术手段; 参数估计和识别是从现有的信号中得到处理者感兴趣的信息和反映信号本质的参数, 进一步将这些信息和参数分类, 用于信号的辨识; 压缩是为了减少信号所需的存储空间, 以及提高信号的通信效率等。

2. 为什么要采用数字信号处理?

自然界的信号基本上都是模拟信号, 因此早期的信号处理都是模拟系统实现的, 这种系统由模拟的电子元器件 (如电阻、电感、电容和运算放大器等) 组成, 直接处理由各类传感器获取的电信号, 其特点是系统工作直接、实时性好, 但是其存在较为严重的两个缺点: 一是当需要改变系统的功能或性能时, 需要重新设计 (更换元器件); 二是模拟电子元器件的性能参数会随着环境条件如温度、湿度以及震动等变化而改变, 同时随着时间推移, 元器件的老化问题也不容忽视。

DSP 系统可以较好地克服上述两个缺点并弥补模拟系统的其他不足。DSP 系统的显著优点可以归纳为以下几条:

(1) 灵活性强。DSP 采用了以微处理器为核心的数字系统，可以只设计和实现一个硬件平台，用不同的软件来执行各种各样的 DSP 任务，当需要改变系统的功能和性能时，只需要改变相应的软件或软件中的参数，而不需要改变硬件平台本身。这种以可编程 DSP 处理器为核心的 DSP 系统，其灵活性是传统的模拟系统所无法比拟的。

(2) 稳定性好。由于数字系统只有两个信号电平“1”和“0”，因而受噪声及环境条件等的影响很小；而且目前数字系统都采用大规模集成电路，其故障率也远比采用众多分立元件构成的模拟系统的故障率低。

(3) 精度高。模拟系统的精度由元器件决定，而模拟的元器件其精度很难达到 10^{-3} 以上，但 17 位字长的数字系统就可达到 10^{-5} 精度。如基于离散傅里叶变换的数字式频谱分析仪，其幅值精度和频率分辨率均远远高于模拟频谱分析仪。因此有些高精度系统只能采用数字系统。

(4) DSP 系统可以实现模拟系统难以达到的指标或特性。例如，有限长脉冲响应 (FIR) 数字滤波器可以实现严格的线性相位；又如实现时分复用，即利用一套计算设备同时处理几个通道信号；又如二维甚至多维信号处理，利用数字系统强大的存储能力，存储二维图像信号或多维阵列信号，实现二维或多维的滤波及频谱分析等；再如 IP 电话中的回声对消以及其他一些应用中的自适应算法，都难以用模拟系统实现。但在数字系统中，各种实时自适应算法都已获得了成功应用。

(5) 大规模集成。因数字器件具有高度规范性，便于大规模集成，大规模生产，且数字电路主要工作在截止状态或饱和状态，对电路参数要求不严格，因此产品的成品率高，价格也日趋降低。专门设计与制作的 DSP 处理器和 DSP 核，就是基于超大规模数字集成电路技术和计算机技术而发展起来的、适合用作 DSP 的高速高位微处理器。它们体积小、功能强、性能好、功耗小，使用灵活方便、性价比高，从一出现就得到了迅速的发展和广泛的应用。

当然模拟系统也不是一无是处，在某些场合还非模拟系统不可，如：

(1) 实时信号处理领域。除系统引入的某些延迟外，模拟系统从根本上说是实时的。尽管随着技术的进步，包括算法的改进和器件速度的提高，DSP 系统的处理速度在不断提高，能够进行实时处理的范围在不断加大，但应用中对实时处理的要求也在不断提高，因此，从实时处理的角度讲，用 DSP 系统完全取代模拟系统，至少在目前来说还不可能。

(2) 射频 (RF) 信号的处理要由模拟系统完成。电磁波是一种重要的资源，是信号传输的主要载体，从长波、中短波、超短波、微波、毫米波一直到光波，人们都在广泛地加以利用。射频信号的发送和接收，都是依靠模拟系统来完成的。

3. 数字信号处理的一般过程和基本框图

由于自然界的大多数信号都是模拟信号，而 DSP 系统凭借其突出的性能在信息领域得到了广泛的应用，因而要用数字系统处理模拟信号，就需要有一个将模拟信号转换为数字信号，以及经数字系统处理完成后，再将输出信号转换为模拟信号的装置。图 1-1 就是用数字信号处理系统处理模拟信号的简单方框图。

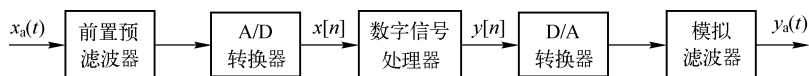


图 1-1 数字信号处理系统的简单方框图

图 1-1 中的 DSP 系统，由 A/D 转换器、数字信号处理器和 D/A 转换器三个主要部分和前置预滤波器和后端的模拟滤波器组成。A/D 转换器（也称模数转换器）的功能是将模拟输入信号 $x_a(t)$ 转换成数字序列 $x[n]$ ，通常由采样、量化和编码等过程完成，而为了保证输入信号 $x_a(t)$

的最高频率限制在一定数值之内，在 A/D 转换之前，需要使用一个连续时间的前置预滤波器对 $x_a(t)$ 的频率范围加以限制。数字信号处理器的功能是将数字序列 $x[n]$ 按预定的要求进行加工处理，转换成输出序列 $y[n]$ ，它是 DSP 系统的核心部分，可以是通用计算机、专用或通用信号处理器。而 D/A 转换器（也称数模转换器）则是将数字序列 $y[n]$ 再转换成模拟信号 $y_a(t)$ 。一般地，经过 D/A 转换器出来的模拟信号会含有大量的高频噪声，所以在其后通常再用一个模拟滤波器滤除 D/A 转换的高频噪声而得到平滑输出的模拟信号 $y_a(t)$ 。

4. 数字信号处理的实现

DSP 通常有以下三种实现方式：

(1) 软件实现：是指在通用计算机或微处理机上编写程序实现各种复杂的信号处理算法。程序由处理者开发，或使用现成的信号处理程序。软件实现的最大优点是灵活、开发周期短，其缺点是处理速度慢，通常用在信号处理算法和科学研究阶段、教学实验和一些对处理速度要求不高的场合。

(2) 专用硬件实现：是指实现某种专门信号处理的专用 DSP 芯片，如快速傅里叶变换芯片、数字滤波器芯片等，这些芯片可以是专用数字信号处理机或专用集成电路。这种方法的主要优点是处理速度快，缺点是不灵活、开发周期长，适用于要求高速实时处理的一些专用设备。这些设备一旦定型，就不能再改，便于大批量生产。

(3) 软硬件结合实现：是指在通用 DSP 芯片上开发用户所需的信号处理功能，这也是目前流行的数字信号处理器，它们是专为信号处理设计的芯片，既具有专门执行信号处理算法的硬件结构，如乘法器、累加器、流水线工作方式、并行处理、多总线、位翻转等，又配置有相应的信号处理软件和专用指令，可实现工程设计中的各种信号处理。这种方法的优点是既具有专用硬件实现的准实时性，又具有软件实现的可灵活编程的特点，是一种重要的数字信号处理实现方法。

5. 数字信号处理的发展与应用

随着 DSP 理论和方法的深入研究以及 DSP 处理器或含 DSP 核的应用处理器的迅速发展和普及，DSP 的应用日益广泛而深入。一是表现在 DSP 理论和技术方面，二是表现在众多的科学学科和工程应用领域方面。

在理论和技术方面可以概括为以下三点：

(1) 由简单的运算走向复杂的运算。目前几十位乘几十位的全并行乘法器可以在几纳秒的时间内完成一次浮点乘法运算，在运算速度和运算精度上均为复杂 DSP 算法的使用提供了先决条件。

(2) 由低频走向高频。A/D 转换器的采样频率已高达数百兆赫，可以将视频甚至更高频的信号数字化后送入计算机处理。

(3) 由一维走向多维。随着计算机存储能力的增加，在高分辨率彩色电视、雷达、石油勘探等多维信号处理的应用领域，也与数字信号处理结下了不解之缘。

在科学学科和工程应用领域方面则举不胜数，这里仅举几例做简要介绍：

(1) 通信。通信领域是 DSP 技术的第一大应用领域，如网络通信、卫星通信、光通信、空间飞行和深空通信、水下通信等，无一不以 DSP 技术为重要支撑。近年来迅速发展的云计算、人工智能、区块链和物联网等，所依赖的高密度、大容量通信，也对所使用的 DSP 技术提出了更高的要求。

(2) 医疗和生物医学工程。现代医学的发展，从疾病起因的研究、患者的检查诊断，到新药的开发、研制及实验室实验和临床试验，没有一项能够离开 DSP。如常见的医学检查设备：

超声设备 (B 超), X 射线断层扫描 (CT)、核磁共振 (MRI)、心电图仪 (ECG)、计算机 X 射线空间重建装置 (CAT)、脑电图仪 (EEG) 等, 和家用的便携式血压计、血糖仪、助听器等都采用了 DSP 技术。此外, 生物特征提取技术如指纹、虹膜、人脸识别、DNA 比对等无一例外地使用了 DSP 技术。

(3) 资源勘探、能源利用和绿色生活。如在矿产资源勘探中, 普遍采用地震法探矿技术, 即使用炸弹产生“人工地震”, 采集从不同地层返回的地震波, 用 DSP 方法判断地层里矿产的存在、分布和储量等; 现代生活中, 能源是人类生活必不可少的消费品之一, 而能源的安全供应、节能减排则是能源使用中的核心研究课题, 如火电、水电、核电系统的安全发电、输电和供电, 各种系统的保护, 故障的监测与修复, 都依赖于 DSP 的方法和设备; 对于节能减排方面, 小到家庭用户分时计费的电表与气表, 大到新能源汽车、飞机中, DSP 技术都处于举足轻重的地位。目前, 一部汽车已经使用数十个 DSP 和微控制单元 (MCU) 处理器, 其应用涉及 GPS 导航、安全气囊、防撞雷达、减震系统、废气监测和相应的燃烧调整系统等, 电子产品的成本已经占到整车成本的 30%~50%。

(4) 国防与军事。坚固而有效的国防力量和军事设备是一个国家及其人民安全生活的重要保证。构建国家防御系统的战略设施主要由指挥中心、各种体制的雷达、通信卫星、通信中继站以及导弹拦截系统等组成, 其中每一个环节都离不开高端 DSP 技术的应用; 其次在智能化武器方面, 如精确制导武器、无人驾驶飞机、坦克、火炮、鱼雷和作战机器人等都已植入了精密的 DSP 技术, 使武器性能得到了大幅度提升。总之, 目前在涉及国家安全的各个领域如保密通信、雷达信号处理、声呐信号处理、导航、全球定位、跳频电台、搜索和反搜索等都是建立在 DSP 技术基础上的, 并进一步发展和应用了 DSP 技术。

(5) 消费电子产品。在消费类电子产品领域中, 微电子技术、计算机技术和 DSP 技术体现得最为淋漓尽致。2017 年, 全世界生产和销售了 15.5 亿部手机, 很难想象还有其他的电子产品能够达到这样的水平。DSP 技术在数字消费类产品中, 可以从事图像压缩与传输等图像信号的处理, 语音的编码、合成、识别及高保真等语音信号的处理及通信信号的调制解调、加密、多路复用、扩频、纠错编码等处理。人们的想象力没有止境, DSP 技术的发展和运用, 包括算法和实现平台的发展, 也没有止境, 对高速度、高性能、小体积、低功耗、低成本追求也没有止境。

6. 本书内容安排

本书作为数字信号处理学科基础课程的教材, 以线性时不变离散时间系统为中心, 介绍一维数字信号处理的基础理论和方法, 包括信号的频谱分析 (从理论离散时间信号的傅里叶变换到工程应用的离散傅里叶变换及快速傅里叶变换)、线性时不变离散时间系统的表示和滤波器设计三部分内容。另外作为先修课程“信号与系统”教材的姐妹教材, 我们在内容取舍和编排上也做了认真而细致的安排。具体而言, 本书内容安排如下:

第 2 章简要复习先修课程“信号与系统”中关于离散时间信号与线性时不变离散时间系统的各种表示、性质以及采样的基本概念, 详细讲述了周期离散时间信号的特点及离散信号的傅里叶变换 (DTFT) 及其性质与特点, 为后面进一步学习离散时间信号与系统理论准备了必备的数学基础。

第 3 章详细讲述离散傅里叶变换 (DFT), 主要涉及频谱的离散化及重构问题。由于 DFT 在时域和频域都是离散的, 从而为傅里叶变换从理论分析走向工程应用提供了有力的保证, 因此 DFT 在数字信号处理应用中起着重要作用。本章由 DFS 导出 DFT 及其逆变换, 并讨论了 DFT 的有关性质。

第4章进一步讲述DFT的计算和实现方法,讨论了快速傅里叶变换(FFT)的数学基础和算法实现,分析了FFT的运算量及应用FFT分析实信号频谱的方法,以及在FIR滤波器实现中的具体应用。

第5章介绍无限长脉冲响应(IIR)数字滤波器的设计方法。分析了理想滤波器和可实现滤波器的差异,进而讨论了描述可实现滤波器的指标参数;依据IIR滤波器的特点,讨论了从模拟滤波器经数学映射变换得到数字滤波器的设计思想和具体方法,给出了脉冲响应不变法和双线性变换法两种设计方法,比较了它们的特点和使用范围。应用频率变换,给出了不同滤波类型的滤波器设计的两种基本思路和步骤。

第6章介绍有限长脉冲响应(FIR)数字滤波器的设计方法。分析了具有线性相位特征的FIR数字滤波器的特点;根据FIR滤波器的特点,研究了窗函数法设计FIR数字滤波器的基本原理和设计方法;讨论了频率采样法设计FIR数字滤波器的原理,实现频域设计线性相位FIR滤波器的目的;并针对现代数字计算机应用的普及,介绍了基于计算机的优化设计思想及切比雪夫最佳一致逼近原理和Remez算法。

第7章讨论数字滤波器工程实现中的具体问题,一是滤波器结构的选择,二是有限字长效应问题。首先介绍了IIR和FIR数字滤波器的常用基本结构;随后对数字系统中的数的表示、信号的量化误差、滤波器系数量化误差、有限字长的乘法运算造成的尾数处理误差和有限字长的加法运算溢出误差进行了简单但有意义的分析和讨论。

此外,为配合数字信号处理的直观演示,本教材延续了作者编著的《信号与系统》教材特点,在每章内容结束时都对本章的关键知识点进行了梳理,并借助MATLAB优越的程序编写和图形展示功能,将各种数字信号处理的变换和分析的结果进行显示,帮助读者更好地理解数字信号处理的过程。