

第1章 绪 论

信号处理丰富的历史和广阔的未来,源自于日益复杂的应用、新的理论进展以及不断涌现出的新的硬件结构和平台之间的强力协作。信号处理应用横跨了多门学科,包括娱乐、通信、空间探索、医学、考古学和地球物理学等,不胜枚举。信号处理算法和硬件广泛见于各种系统,从专用的军事系统和工业应用,到各种廉价大宗的消费电子产品。虽然人们认为多媒体系统,如高清视频、高保真度音响系统和互动游戏等具有的卓越性能是理所当然的,但其实这些系统的性能好坏都强烈地依赖于当今信号处理的发展水平。所有的现代移动电话,其核心就是高级数字信号处理器。MPEG 音频、视频以及 JPEG^① 图像数据压缩标准都强烈地依赖于本书所讨论的许多信号处理原理和技术。高密度数据存储装置和新的固态存储器越来越依赖于采用信号处理技术来实现相对于其他脆性技术的稳固性和鲁棒性。当展望未来时,信号处理的作用仍在日益增强,这其中的一部分原因就是,无论在民用领域,还是在先进的工业和政府部门的应用中,通信、计算机和信号处理都是融为一体的。

日渐扩展的应用范围和对日益复杂的算法的需求总是与实现信号处理系统的器件技术的快速发展齐头并进的。有人预测,在下一个 10 年内,专用信号处理微处理器及个人计算机的处理能力有可能增加几个数量级,这甚至已逼近摩尔定理的极限。显然,信号处理的重要性和地位将继续以越来越快的速度向前发展和扩大。

信号处理关注的是信号及其所包含信息的表示、变换和运算。例如,可能希望对两个或多个经过某种操作,如加法、乘法或卷积处理,而混合在一起的信号进行分离,或者要想来增强某些信号分量或估计一个信号模型中的某些参量。在通信系统中,信号在送入一条通信信道上进行传输之前,一般要做一些类似调制、信号调节和压缩等操作的预处理,然后在接收端进行后处理以恢复原始信号的复制版本。早在 20 世纪 60 年代之前,这类信号处理手段几乎无一例外地都是连续时间的模拟技术^②。数字计算机和微处理器的飞速发展,以及模拟到数字(A/D)和数字到模拟(D/A)转换的低成本芯片的出现,导致了向数字技术方面的不断转移。技术上的这些发展还得到了许多重要理论进展的增援,例如快速傅里叶变换(FFT)算法、参数信号建模、多采样率技术、多相滤波器实现和诸如小波展开的信号表示新方法等。模拟无线电通信系统正在演变为一种可重新配置的、几乎完全由数字计算实现的“软件无线电”系统,这正是向数字技术转移的典型例子。

离散时间信号处理的本质是对用整数变量进行标号的数值序列的处理,该序列并不是一个连续独立变量的函数。在数字信号处理(DSP)中,信号是用有限精度的数的序列来表示的,且用数字运算来实现处理。更为一般的术语——**离散时间信号处理**,既包括了作为一种特殊情况的数字信号处理,也包括了用其他一些离散时间技术处理样本序列(采样数据)的可能。离散时间信号处理和数字信号处理这两个术语之间的区别并不重要,因为两者关心的都是离散时间信号。当采用高精度计算时,这一点显得尤为正确。虽然有很多例子其中要处理的信号本身就是离散时间序列,但

① 缩略语 MPEG 和 JPEG 是在普通闲聊时都会用到的术语,用来指国际标准化组织(ISO)中“动态图像专家组”(MPEG)和“联合图像专家组”(JPEG)制定的标准。

② 一般说来,把“时间”当成独立变量,即使在某些特定场合,独立变量可能取其他任何可能的量纲。这样,连续时间和离散时间都应分别看作是连续和离散独立变量的通用术语。

是大多数的应用还是涉及要用离散时间技术来处理原本是连续时间的信号。在这种情况下,通常一个连续时间信号先要转换成一个样本序列,即一个离散时间信号。实质上,激发数字信号处理得到广泛应用的最重要的原因是基于噪声成形差分量化技术的低成本 A/D 和 D/A 转换芯片的发展。进行离散时间处理之后,再把输出序列转换成连续时间信号。对于这样的系统,人们往往都希望它们能实时工作。随着计算机处理速度的提高,连续时间信号的实时离散时间处理在通信系统、雷达、声呐、语音和视频编码与增强,以及生物医学工程等各方面的应用都已是司空见惯。非实时应用同样是随处可见。压缩磁盘播放器和 MP3 播放器是对输入信号只进行一次处理的非对称系统的典型例子。最初的处理可以是实时进行的,也可以慢于或快于实时处理。输入信号处理之后的形式被保存起来(存储在压缩磁盘或固态存储器中),当对输出信号进行回放以备收听时,再实时完成最后处理来重构音频信号。压缩磁盘和 MP3 录制和回放系统依赖于许多信号处理的概念,而这些概念就是本书要讨论的。

金融工程代表了另一个集许多信号处理概念和技术于一体的快速增长的领域。经济数据的有效建模、预测和滤波处理技术可以在经济特性行为和稳定方面获得极大效益。例如,证券投资经理越来越依赖于采用复杂的高级信号处理技术,因为即使是在信号预测能力或信噪比(SNR)上有少量增加,也可以导致在特性行为上的显著获益。

另一类重要的信号处理问题是**信号解释**,在这个问题中,处理的目的是要得到输入信号的某种特征。例如,在语音识别或理解系统中,其目的是为了解释输入信号,或者从输入信号中提取信息。一般说来,这种系统起着一种数字预处理(滤波、参量估计等)的作用,在其之后紧跟着一个模式识别系统,以产生某种符号表示,如语音的音位符号表示。这种符号输出可以依次作为一个能提供最终信号解释的符号处理系统(如基于某一规则的专家系统)的输入。

还有一类比较新的信号处理方法,它涉及信号处理表达式的符号运算。这种处理形式在信号处理工作站和对信号处理系统的计算机辅助设计中都有潜在的应用价值。在这类处理中,信号与系统都是用抽象的数据对象来表示和运算的。面向对象的程序设计语言对于处理信号、系统和信号处理表达式提供了方便的环境,而不用明确对数据序列进行求值。设计用来对信号表达式进行处理的系统的复杂程度直接受所包含的基本信号处理概念、定理和性质(如组成本书基础的那些内容)的影响。例如,一种信号处理环境具有在时域卷积就相当于频域相乘这样的性质,就可以用来研究各种不同滤波结构的组合,其中包括那些涉及直接利用离散傅里叶变换(DFT)和快速傅里叶变换(FFT)的算法。类似地,结合采样率和混叠之间关系的环境,就能够在滤波器实现中有效地利用抽取和内插的手段。有关在网络环境下实现信号处理的类似想法近来也正在进行探索。在这种类型的环境中,可以用一种高级的处理描述来实现对数据的潜在标示,而详细的实现则能动态地依据网上所能利用的资源来完成。

本书所讨论的很多概念和设计方法都结合了像 MATLAB、Simulink、Mathematica 和 LabVIEW 这样一些先进的软件系统结构。在许多情况下,离散时间信号都是在计算机中获得并存储起来的,而这些工具就允许用一些基本函数来构成极为复杂的信号处理运算。在这样的情况下,一般并不需要知道实现某一运算的算法细节(如 FFT),但是,需要明白计算的是什么,以及应该如何来解释计算出的结果,这才是主要的。换句话说,对本书所讨论的概念有充分的理解,对于巧妙地利用现有有广泛可利用的信号处理软件工具来说仍是最基本的。

信号处理问题自然不仅仅局限于一维信号。虽然在理论上一维与多维信号处理之间存在着一些基本的差别,但是本书所讨论的大部分内容在多维系统中都有其直接对应的形式。有关多维数字信号处理理论在各种参考资料中都有详细论述,包括 Dudgeon and Mersereau (1984), Lim (1989)

和 Bracewell (1994)①。许多图像处理的应用问题需要用到二维信号处理技术,如视频编码、医学图像、航空照片的增晰与分析、卫星气象照片的分析以及从月球和深层空间探测来的视频传输信号的增晰等,都属于这一类情况。多维数字信号处理在图像处理方面的应用在 Macovski (1983), Castleman (1996), Jain (1989), Bovik (ed.) (2005), Woods (2006) Gonzalez and Woods (2007) 和 Pratt (2007) 等人的著作中都有专门的论述。像在石油勘探、地震检测和核试验监测等方面所要求的地震数据分析都要利用多维信号处理技术。有关在地震学方面的应用在 Robinson and Treitel (1980) 和 Robinson and Durrani (1985) 的著作中均有论述。

多维信号处理仅仅是众多先进和专门论题中的一个,这些论题所依赖的基础均在本书的覆盖范围之内。基于利用离散傅里叶变换和信号建模的谱分析是信号处理另一个特别丰富而重要的方面。第10章和第11章将介绍这方面的很多内容,重点关注与离散傅里叶变换和参数信号建模应用有关的一些基本概念和技术。第11章还较详细地讨论了高分辨率频谱分析方法,这些方法都是基于把信号表示成一个离散时间线性时不变(LTI)滤波器对单位脉冲或白噪声的响应来进行分析的。频谱分析可以通过对系统参数(如差分方程的系数)进行估计,再求出该滤波器模型频率响应的幅度平方来实现。有关这些方面的详细讨论可以在 Kay (1988), Marple (1987), Therrien (1992), Hayes (1996) 和 Stoica and Moses (2005) 等人的著作中找到。

信号建模在数据压缩和编码中也起着重要的作用,并且差分方程的基本原理再次为理解这些技术的很多方面奠定了基础。例如,一种称为线性预测编码(LPC)的信号编码技术就是利用这样一个概念:如果一个信号是某个离散时间滤波器的响应,那么在任意时刻的信号值就是先前那些值的线性函数(因此可以由先前信号值而线性预测出当前信号值)。这样,通过估计出这些预测参数,并将它们与预测误差一起用来表示信号,就可以得到有效的信号表示。若需要时,该信号也可以利用模型参数重新产生。这类信号编码技术在语音编码中一直是特别有效的,这些在 Jayant and Noll (1984), Markel and Gray (1976), Rabiner and Schafer (1978) 和 Quatieri (2002) 等人的著作中均有非常详细的论述,在第11章也将有较详细的讨论。

另一个非常重要的近代论题是自适应信号处理。自适应系统代表着一类特殊的时变且在某种意义上是非线性的系统。这类系统具有广泛的应用,而且对它们的分析与设计已建立了一套很有效的方法。同样,这些方法的很多方面也都是以本书所讨论的离散时间信号处理的基本原理为基础的。有关自适应信号处理的详细论述可参见 Widrow and Stearns (1985), Haykin (2002) 和 Sayed (2008) 的著作。

这些仅仅代表了本书所包含的内容所延伸出来的众多近代论题中的几个方面,其他的还包括一些先进的和专门的滤波器设计方法,计算傅里叶变换的各种专门算法,一些特定的滤波器结构,以及包括小波变换在内的各种近代多采样率信号处理技术,等等。[关于这些主题的阐述可参见 Burrus, Gopinath, and Guo (1997), Vaidyanathan (1993) 和 Vetterli and Kovačević (1995) 等人的著作。]

人们常常认为,一本基础性教科书的目的是揭示而不是包罗某一学科。笔者一直遵循着这一宗旨来精选本书的内容及其深度。前面有关近代论题的简单讨论和书末所附的参考文献已经足够清楚地展现出,还有许多具有挑战性的理论和值得注意的应用有待揭示,这就需要我们勤奋地学习 DSP 的基础理论以做好充分的准备。

历史的回顾

离散时间信号处理以不寻常的步伐走过了一段历史时期,回顾一下这个领域的发展将提供一

① 全书中作者的姓名和所注年代均用来指明本书末尾所列参考文献中的书目和论文。

个很有价值的有关该领域现在及未来较长时间内仍具有核心地位的一些基础内容的看法。自 17 世纪发明微积分以来,科学家和工程师们就已经建立了利用连续变量函数和微分方程来表示物理现象的各种模型。然而,当解析解不可能得到时,为了求解这些方程已经使用了数值解法。的确,牛顿使用过的有限差分法就是本书将要介绍的某些离散时间系统的特殊情况。18 世纪的数学家,如 Euler, Bernoulli 和 Lagrange 等已经建立了连续变量函数的数值积分和内插方法。由 Heideman, Johnson and Burrus (1984) 所做的很有趣的历史研究表明:早在 1805 年,高斯就发现了快速傅里叶变换(将在第 9 章讨论)的基本原理,而这时傅里叶关于函数的谐波级数表示法的论文尚未发表!

直到 20 世纪 50 年代初,信号处理还是用模拟系统来完成的,实现这些模拟系统多是用电子线路,甚至还有用机械装置的。即使数字计算机已逐渐在商业场合和科学实验室获得应用,但其价格却异常昂贵,能力也相当有限。在那个时期,某些应用领域对更为复杂的信号处理的需求激发了人们对离散时间信号处理的极大兴趣。数字计算机在数字信号处理方面最初获得应用的一个领域就是石油勘探,这里可以将频率相对较低的地震数据进行数字转化后用磁带记录下来,以供事后处理。这类信号处理一般来说是不能实时完成的,几秒钟的数据往往要耗去几分钟,甚至几个小时的计算时间。即便如此,由于数字计算机的灵活性和潜在的回报能力使得这种方法仍颇受欢迎。

同样还是在 20 世纪 50 年代,数字计算机在信号处理方面的应用正以另外一些不同的方式出现。由于数字计算机的灵活性,在用模拟硬件实现某一信号处理系统之前,在数字计算机上先对该系统进行仿真往往是很有用的。在这种方式下,一种新的信号处理算法或系统在经济和工程资源上投入实施之前,均可在一种很灵活的实验环境中加以研究。这类仿真的典型例子就是由 MIT 林肯实验室和贝尔电话实验室所研究实现的声码器仿真。例如,在一个模拟信道声码器的实现中,滤波器的特性会影响已编码语音信号可理解程度的质量,而对这种质量又很难客观地进行定量研究。通过计算机仿真可以调节这些滤波器特性,从而可在模拟装置出来之前就对一语音编码系统的感知音质给予评估。

在所有这些利用数字计算机进行信号处理的例子中,计算机在灵活性方面表现出了极大的优越性。但是,这些处理未必总是能实时完成。因此,持续到 20 世纪 60 年代末的盛行一时的做法仅是将数字计算机用作逼近或仿真某一模拟信号处理系统。与此相仿,早期的数字滤波就非常热衷于这样一些方式:把一个滤波器在数字计算机上编成程序,这样就可以将信号先做模/数转换,然后进行数字滤波,再接着做数/模转换,以使整个系统近似成为一个好的模拟滤波器。在语音通信、雷达信号处理或任何其他应用中,数字系统可能真正实现实时信号处理的想法,即使是在当时最为乐观的情况下,仍被认为是具有很高风险的。当然,处理速度、成本和体积大小都曾是人们偏向于应用模拟元件的三个重要因素。

在数字计算机上实现信号处理的同时,研究人员自然有一种愿望要尝试日益复杂的信号处理算法。其中一些算法就是由于数字计算机的灵活性而发展起来的,而用模拟设备是无法实现的。因此,很多这些算法都曾被看作是一些有趣的,但多少有些不切实际的想法。这样一些信号处理算法的发展使得用全数字化来实现信号处理系统的想法更具诱惑力。最初在数字声码器、数字频谱分析仪及其他全数字化系统的研究上开始了积极有效的工作,希望这些系统最终会变成可以实际应用的系统。

Cooley and Tukey (1965) 发现的一种计算傅里叶变换的高效算法,即大家所熟知的 FFT,进一步加速了迈向离散时间信号处理的进程。以下几个原因说明 FFT 是很有意义的。当时用数字计算机实现的许多信号处理算法所要求的处理时间要比实时处理大几个数量级。这常常是由于谱分析是信号处理中的一个重要组成部分,而在当时却没有一种高效的算法来实现它。而快速傅里叶变

换算法将傅里叶变换的计算时间减少了几个数量级,使得一些复杂的信号处理算法的实现在其处理时间内允许与系统之间可以在线交互试验。再者,快速傅里叶变换算法事实上可以用专用数字硬件来实现,这样从前出现的很多曾认为是不切实际的信号处理算法开始显露出具体实现的可能。

FFT 的另一个重要内涵就是它本身属于离散时间范畴。它可以直接计算离散时间信号或序列的傅里叶变换,并且它所涉及的许多性质和数学方法完全都属于离散时域的范畴;也就是说,它不只是一个对连续时间傅里叶变换的近似。由此激发了人们用离散时间数学方法来重新形成很多信号处理概念和算法的想法,之后这些技术建立了完整的离散时间域内的各种关系。这样就改变了把在数字计算机上进行信号处理只是单纯地看作是对模拟信号处理技术的某种近似的看法,进而产生了把离散时间信号处理作为一门单独的重要研究领域的浓厚兴趣。

离散时间信号处理发展史上另一个主要进展出现在微电子学领域。微处理器的发明及其在数量上的激增为离散时间信号处理的廉价实现铺平了道路。尽管第一台微处理器因速度太慢而不能实时地实现大部分离散时间系统(除了采样率非常低的情况),但是到了 20 世纪 80 年代中期,集成电路技术已经发展到了一个新的水平,能够制造出在结构上专门为实现离散时间信号处理算法而设计的高速定点和浮点微型计算机。随着这种技术的到来,第一次展现出了离散时间信号处理技术具有广阔应用的可能性。微电子学的高速发展,还以另一种方式深刻地影响着信号处理算法的发展。例如,在实时数字信号处理装置产生之初,存储器相对比较昂贵,因此信号处理算法推进的一个重要性能指标就是存储单元的高效利用。如今,数字存储已如此廉价,使得许多算法都倾向于采用比绝对所需存储容量更大的存储需求,来换取处理器所需功率的降低。对 DSP 全面发展可能存在极大阻碍的另一个技术局限就是信号从模拟形式向离散时间(数字)形式的转换。首次广泛应用的 A/D 和 D/A 转换器是成本为几千美元的独立装置。而数字信号处理理论与微电子技术相结合之后,过采样 A/D 和 D/A 转换器的成本仅为几美元,甚至更低,这使得各种各样的实时应用成为可能。

类似地,最小化算术操作次数(如乘法或浮点加法次数),如今也不再显得那么重要,因为多核处理器具有多个可用的乘法器,此时更重要的是如何降低各处理核之间的通信量,必要时甚至可以使用更多的乘法操作。例如,在多核环境中,DFT 的直接计算(或采用 Goertzel 算法)甚至比应用 FFT 算法更“高效”,即使需要更多的乘法操作,但处理器之间的通信需求可以得到极大降低,因为采用 DFT 直接计算时处理工作可以更有效地在多个处理器或处理核上进行分配。更广泛地讲,为了充分挖掘并行和分布式处理带来的机会而对算法进行重构或研究新的算法,已经成为信号处理算法发展的一个新的重要方向。

未来的展望

微电子学的工程师们仍在继续为提高电路的集成度和产量而奋斗着,因此微电子学系统的复杂性和先进程度也在不断地稳步提高。的确,自 20 世纪 80 年代初以来,DSP 芯片的复杂性和容量一直成指数地增长着,并且没有任何放慢的迹象。随着整片集成技术的迅速发展,价廉、超微型和低功耗的很复杂的离散时间处理系统也将会实现。进一步,类似微机电系统(MEMS)的各类技术也承诺可以生成各种微型传感器,而这些传感器的输出将利用在传感器输入的分布式阵列上操作的 DSP 技术来进行处理。因此,离散时间信号处理的重要性无疑仍会与日俱增,而且未来这一领域的发展很可能比刚刚描述的发展进程更富戏剧性。

当前,离散时间信号处理技术在某些应用领域已经引起了革命性的变化。电信领域就是一个明显的例子,在该领域中离散时间信号处理技术、微电子技术和光纤传输技术的结合,正以一种真正的革命方式改变着通信系统的面貌。可以预见,类似的冲击也将会波及许多其他的技术领域。

事实上,信号处理已经成为,并且会一直成为新应用不断涌现的领域。对一个新应用领域的需求可以通过对来自其他应用的内容进行调整来得到满足,但往往新的应用需要产生新的算法及实现这些算法的新硬件系统。正是由于早期地震、雷达和通信领域的需求,极大地促进了本书所要讨论的许多核心信号处理技术的形成。当然,信号处理在国防、环境、通信以及医疗保健和诊断领域的核心地位仍将维持不变。近年来信号处理在金融和 DNA 序列分析这样一些新领域中也得到了广泛应用。

虽然很难对信号处理还会在哪些方面产生新的应用进行预测,但毫无疑问,对于那些随时准备发现它们的人们来说,它们会日渐明显。为解决新的信号处理问题做准备的关键是,进行信号与系统的基础数学理论及相关设计和处理算法的全面训练,这一点在整个信号处理发展过程中一直如此。虽然离散时间信号处理是一个不断更新和飞速发展的领域,但是它的基础已经日臻完善,非常有必要来进行很好的学习。本书的目的就是通过提供一种对离散时间线性系统、滤波、采样、离散时间傅里叶分析及信号建模的联合论述来揭示该领域的基础理论。本书内容应该为读者理解离散时间信号处理的广泛应用提供必要的知识,并为他们能够在这一令人振奋的技术领域的未来发展中做出贡献奠定坚实的基础。

电子工业出版社版权所有
盗版必究