高等学校电子信息科学与工程专业教材

数字信号处理

刘益成　孙祥娥　编著

電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
http://www.phei.com.cn

高等学校电子信息科学与工程专业教材

数字信号处理

刘益成　孙祥娥　编著

電子工業出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京·BEIJING

内容简介

本书主要介绍数字信号处理的基本理论与分析方法。全书共8章。第1~2章,作为数字信号处理的基础,介绍离散时间信号与系统的时域分析方法、Z变换,以及频域分析方法等内容;第3章介绍离散傅里叶变换及其快速算法;第4~6章分别介绍数字滤波器的结构、IIR与FIR滤波器的设计方法,这些都是数字信号处理的必修内容;第7章论述数字信号处理中的有限字长效应;第8章讨论数字信号处理的软件实现方法,介绍目前在国内外获得广泛应用的MATLAB软件包及其信号处理工具箱的使用方法。书中每章后都附有习题。书后共有4个附录。附录A为快速傅里叶变换的FFT C语言程序,附录B为用窗函数法设计FIR数字滤波器的C语言程序,附录C和D分别列出MATLAB软件包中的常用数学、作图函数及MATLAB信号处理工具箱中的主要函数,以便读者查阅。为了方便教学,本书提供电子课件,具体情况请查阅http://edu.phei.com.cn。

本书可作为电子信息类本、专科学生学习数字信号处理的教材或教学参考书,也可作为有关科技人员从事数字信号处理方面工作时的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

数字信号处理/刘益成,孙祥娥编著.—北京:电子工业出版社,2004.3
高等学校电子信息科学与工程专业教材
ISBN 7-5053-9680-3

Ⅰ.数… Ⅱ.①刘… ②孙… Ⅲ.数字信号—信号处理—高等学校—教材 Ⅳ.TN911.72

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第012097号

责任编辑:凌　毅
印　　刷:北京大中印刷厂
出版发行:电子工业出版社
　　　　　北京市海淀区万寿路173信箱　邮编100036
经　　销:各地新华书店
开　　本:787×980　1/16　印张:21.75　字数:501千字
印　　次:2004年3月第1版　2004年3月第1次印刷
印　　数:5000册　　定价:27.80元

前　　言

信号处理是科学研究和工程技术许多领域都需要进行的一个重要环节，这种处理包括信号的检测、变换、滤波、压缩、传输、信息提取、显示等。由于自然界中的各种信号，例如光、电、声、振动、压力、温度等通常表现为在时间和幅度上都是连续的模拟信号，因此传统上对信号的处理大都采用模拟系统（或电路）来实现。随着人们对信号处理要求的日益提高，以及模拟信号处理中一些不可克服的缺点，对信号的许多处理转而采用数字的方法来进行。近年来由于大规模集成电路和计算机技术的进步，信号的数字处理技术得到了飞速发展。数字信号处理系统无论在性能、可靠性、体积、耗电量、成本等诸多方面都比模拟信号处理系统优越得多，使得许多以往采用模拟信号处理的系统越来越多地被数字处理系统所代替，这反过来进一步促进了数字信号处理技术的发展，其应用领域包括通信、计算机网络、雷达、自动控制、地球物理、声学、天文、生物医学、消费类电子产品等国民经济的各个部门，已经成为信息产业的核心技术之一。数字信号处理的理论与技术本身也成为信号与信息处理学科中一个重要且十分活跃的分支。

数字信号处理本质上是利用数学的方法和数字系统来实现对信号的处理，它主要研究两个方面的问题：其一是研究信号处理的各种处理算法，即建立数学模型；其二是算法的实现，包括采用计算机软件实现，或采用专用的数字系统实现。目前，随着数字化的深入，许多新型的器件，如数字信号处理单片机（DSP）和各种专用集成芯片（ASIC），在数字信号处理系统的实现中扮演了越来越重要的角色。

算法的研究是信号处理的基础，从数学的角度而言，信号可分为确定信号与随机信号、线性与非线性信号。信号的类型不同，对它们进行处理的算法也就不同。从传统的傅里叶分析到现代的谱估计方法和小波分析，从经典的线性系统分析方法到非线性的混沌分析与人工神经网络方法，其应用的数学方法几乎涉及到了所有的数学分支。同时由于应用的领域不同，信号处理的算法也各不相同，例如，语音通信需要处理一维的信号，图像与视频处理则分别需要处理二维和三维的信号。因此算法研究是一个理论性很强的问题。另一方面，数字信号处理系统的实现要涉及电子器件、计算机硬件、软件、工艺等各方面知识，并且随着时间的推移，新的器件还在不断地涌现。因此，数字信号处理是一个内容十分丰富、涉及面广泛且发展很快的学科。本书作为电子信息类本科生对数字信号处理的入门性的教材，限于篇幅，将仅着重讨论离散线性时不变确定信号与系统的基本理论与分析方法，这也是进一步学习所有其他类型数字信号处理的基础。

全书分 8 章和 4 个附录，每一章后面都附有习题。第 1～2 章，作为数字信号处理的基础，介绍离散时间信号与系统的时域分析方法、Z 变换，以及频域分析方法等内容；第 3 章介绍离

散傅里叶变换及其快速算法;第 4～6 章分别介绍数字滤波器的结构、IIR 与 FIR 滤波器的设计方法,这些都是数字信号处理的必修内容;第 7 章论述数字信号处理中的有限字长效应;第 8 章讨论数字信号处理的软件实现方法,介绍目前在国内外获得广泛应用的 MATLAB 软件包及其信号处理工具箱的使用方法。对于学生和初学者来说,该软件包简单易学的语言和极好的图形方式,为信号处理的学习提供了一个直观快速的仿真工具,可以加深学生对基本理论与方法的理解。附录 A 为快速傅里叶变换的 FFT C 语言程序,附录 B 为用窗函数法设计 FIR 数字滤波器的 C 语言程序,供学生上机实验与练习之用。附录 C 列出了 MATLAB 软件包中的常用数学与作图函数,附录 D 给出了 MATLAB 信号处理工具箱中的主要函数,以便读者使用时查阅。

本书第 7 章由孙祥娥老师编写,附录 A 和附录 B 的 C 语言程序由沈孝科老师调试通过,其余各章由刘益成老师编写。武汉大学甘良才教授和华中科技大学王殊教授审阅了全书,提出了不少宝贵的意见。此外,在本书编写过程中,还得到王福昌教授、余厚全教授和张光明博士的关心和支持,作者在此一并表示衷心感谢!

由于作者水平有限,书中缺点和错误在所难免,恳请广大读者批评指正。

编　者

目　录

第 1 章　离散时间信号与系统

1.1　离散时间信号

1.1.1　离散时间信号及其时域表示

离散时间信号在物理上是指定义在离散时间上的信号样品的集合，这样的样品集合可以是本来就存在的，也可以是由模拟信号通过采样得来的或者是用计算机产生的。离散时间信号在数学上可用时间序列$\{x(n)\}$来表示。其中$x(n)$代表序列的第n个样点的数字，n代表时间的序号，n的可取值范围为$-\infty<n<\infty$的整数，n取其他值$x(n)$没有意义。例如，如果信号样品的集合是通过对模拟信号$x_a(t)$每隔T时间等间隔地抽样而获得的$\{x_a(nT)\}$，对于这种等间隔的抽样信号，在实际信号的存储与处理中，除了抽样率发生变化或者将抽样信号恢复成模拟信号时的情况外，时间间隔T并不需要明显地表现出来，我们更注意的是抽样样品之间的相对位置，即时间序号n。因此为了方便，通常将T去掉而用时间序列$\{x(n)\}$来代替$\{x_a(nT)\}$，它在数值上与模拟信号的关系为

$$x(n)=x_a(nT) \tag{1-1-1}$$

在本书中，离散时间信号与序列将不予区分。表示离散时间信号的方法可采用枚举的方式。例如

$$\{x(n)\}=\{\cdots,-\dot{1}.5,-8.7,\underset{\uparrow}{2.53},0.0,6,7.2,1,-5.6,\cdots\}$$

上面的箭头指定时间零点的位置。在上面表示的离散信号中有

$$x(-1)=-8.7,x(0)=2.53,x(1)=0.0,\cdots$$

等。离散信号也可以用公式来表示，例如

$$x(n)=\sin\omega n \qquad -\infty<n<\infty$$

$$x(n)=\begin{cases}a^{-n} & n\geqslant 0,\ |a|\geqslant 1\\ b^{n} & n<0,\ |b|\geqslant 1\end{cases}$$

离散信号还可以采用图形的方式来表示，如图 1-1-1 所示。图中横坐标n表示离散的时间坐标，且仅在n为整数时才有意义。纵坐标则代表信号样点的值。

许多时候为了方便，直接用$x(n)$来代表序列全体$\{x(n)\}$，这时要根据情况注意区分$x(n)$指的是序列全体还是序列在n时刻的样值。如果序列为复数，则通常可将其分开用实部与虚部来表示，即

$$x(n)=x_R(n)+jx_I(n)$$

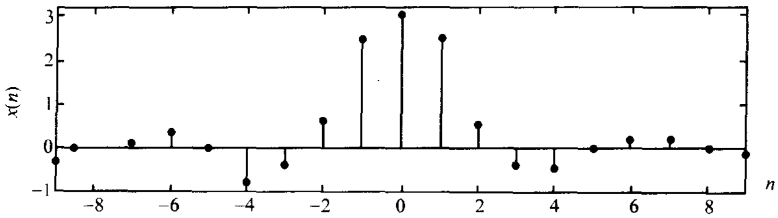


图 1-1-1　离散信号的图形表示

1.1.2　序列的基本运算

离散信号处理中有以下几种最基本的运算。

1. 序列的加减

序列的加减指将两序列序号相同的数值相加减，即

$$y(n) = x_1(n) \pm x_2(n)$$

2. 序列的乘积

序列的乘积指将两序列序号相同的数值相乘，即

$$y(n) = x_1(n) \cdot x_2(n)$$

如图 1-1-2 所示为序列的加和乘的示意图。

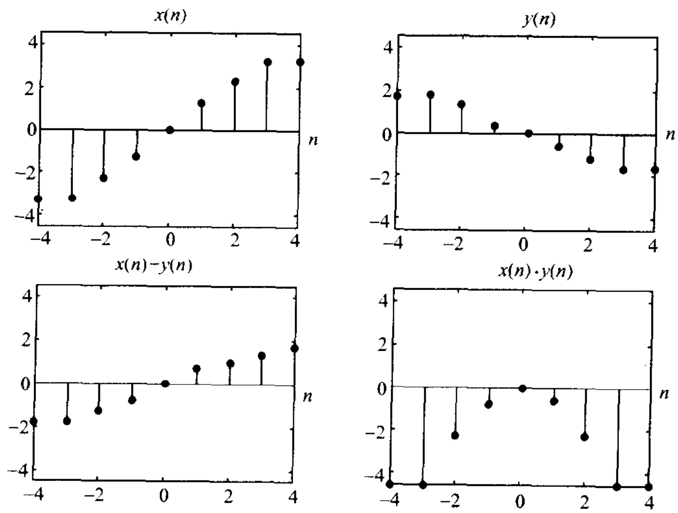


图 1-1-2　序列的加和乘

3. 序列的延时

序列的延时是将序列全体在时间轴上移动。

$$y(n) = x(n - n_0)$$

$n_0 < 0$ 左移，$n_0 > 0$ 右移，如图 1-1-3 所示。

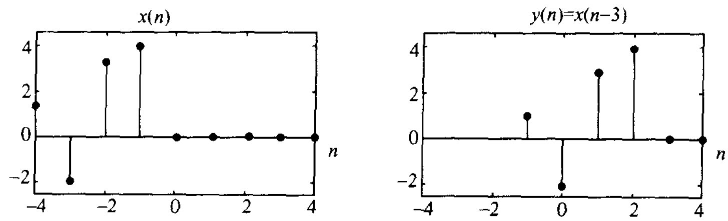


图 1-1-3　序列的移位

4. 序列乘常数

序列乘以常数指将序列的每一个值都乘以常数，即

$$y(n) = ax(n)$$

5. 序列的反褶

序列的反褶是将序列以 $n = 0$ 为对称轴进行对褶，如图 1-1-4 所示。

$$y(n) = x(-n)$$

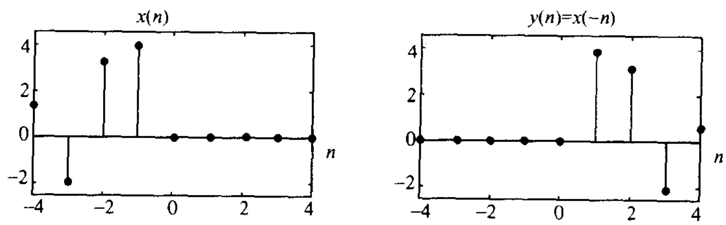


图 1-1-4　序列的反褶

6. 序列的差分运算

序列的差分运算指同一序列相邻两个样点之差，分为前向差分和后向差分。

前向差分

$$\Delta x(n) = x(n+1) - x(n)$$

后向差分

$$\nabla x(n) = x(n) - x(n-1)$$

比较以上二式，显然有

$$\nabla x(n) = \Delta x(n-1)$$

当对序列进行多次差分时,就变成了高次差分,例如二次差分

$$\begin{aligned}\nabla^2 x(n) &= \nabla[\nabla x(n)] = \nabla x(n) - \nabla(n-1)\\ &= x(n) - 2x(n-1) - x(n-2)\end{aligned}$$

7. 序列的抽取与插值

序列的抽取指将原来的序列每隔 M 个样点保留一个样点,去掉其中的 $M-1$ 个样点而形成的新序列,即按 $M:1$ 对原序列的数据进行了压缩,如图 1-1-5 所示。图中,图(a)、(b)、(c) 为

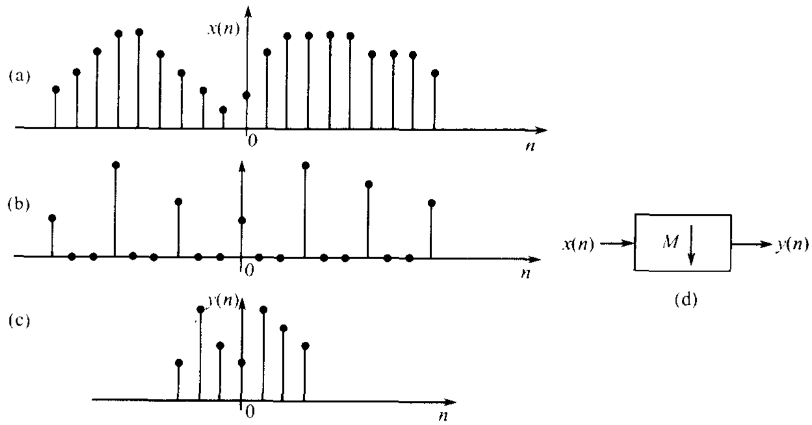


图 1-1-5　序列的抽取

抽取的分解过程,图(d) 为示意图。若 $x(n)$ 为原来的序列,$y(n)$ 为抽取后的序列,则 $x(n)$ 与 $y(n)$ 之间的关系为

$$y(n) = x(nM)$$

序列的插值则是相反的过程,在原来的序列的每两个样点之间等间隔地插入 L 个新的样点,从而变成一个具有更多样点的新序列,如图 1-1-6 所示。图中,图(a)、(b)、(c) 为插值的分解过程,图(d) 为示意图。若 $x(n)$ 为原来的序列,$y(n)$ 为插值后的序列,则 $x(n)$ 与 $y(n)$ 之间的关系为

$$y(n) = \begin{cases} x(n/L) & n = 0, \pm L, \pm 2L, \cdots \\ 0 & \text{其他} \end{cases}$$

插值和抽取通常用在由模拟信号变成的数字信号需要进行采样率转换的多抽样率信号处理中,有关详细内容请参阅有关书籍,例如文献[11] 和[13]。

例 1-1-1　$x_1(n) = \begin{cases} 3^{-n} & n \geq 0 \\ 0 & n < 0 \end{cases}$, $x_2(n) = \begin{cases} 2^n & n < 0 \\ 0 & n \geq 0 \end{cases}$, $a_1 = 5, a_2 = 5$,求:

(1) $y_1(n) = x_2(-n)$

(2) $y_2(n) = x_1(n-5)$

(3) $y(n) = a_1 x_1(n) + a_2 y_1(n)$

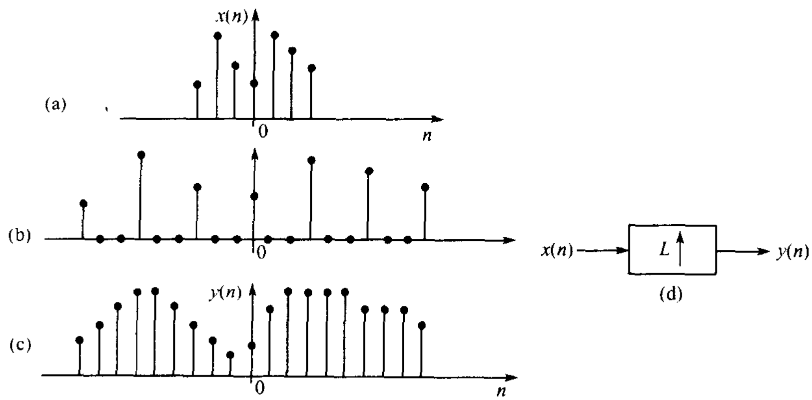


图 1-1-6　序列的插值

解　(1)$y_1(n) = x_2(-n) = \begin{cases} 2^{-n} & n > 0 \\ 0 & n \leqslant 0 \end{cases}$

(2)$y_2(n) = \begin{cases} 3^{-(n-5)} & n \geqslant 5 \\ 0 & n < 5 \end{cases}$

(3)$y(n) = a_1 x_1(n) + a_2 y_1(n) = \begin{cases} 5 & n = 0 \\ 5 \times 3^{-n} + 3 \times 2^{-n} & n > 0 \end{cases}$

1.1.3　一些常用序列

下面列出几种最常用的时间序列，这些序列在数字信号处理中具有十分重要的作用。

1. 单位脉冲序列 $\delta(n)$

该信号仅在 $n = 0$ 时，取确定值 1，其他时刻都为零。如图 1-1-7 所示，其表达式如下

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

$\delta(n)$ 在离散信号和系统中的作用和冲激函数 $\delta(t)$ 在连续信号和系统中的作用一样重要。

2. 单位阶跃序列 $u(n)$

$$u(n) = \begin{cases} 1 & n \geqslant 0 \\ 0 & n < 0 \end{cases} \tag{1-1-3}$$

单位阶跃序列 $u(n)$，如图 1-1-8 所示。它与单位脉冲序列的关系为

$$\delta(n) = u(n) - u(n-1)$$

$$u(n) = \sum_{m=0}^{\infty} \delta(n-m)$$

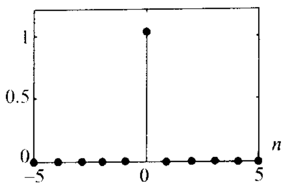


图 1-1-7　单位脉冲序列 $\delta(n)$

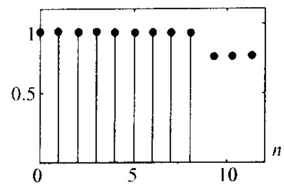


图 1-1-8　单位阶跃序列 $u(n)$

3. 矩形序列 $R_N(n)$

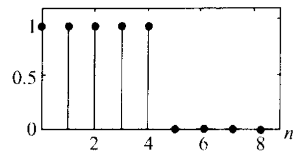


图 1-1-9　矩形序列 $R_N(n)$

$$R_N(n)=\begin{cases}1 & 0\leqslant n\leqslant N-1\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{1-1-4}$$

它与 $u(n)$ 的关系为

$$R_N(n)=u(n)-u(n-N)$$

如图 1-1-9 所示为矩形序列 $R_N(n)$ 的示意图。

4. 复指数序列

$$x(n)=\mathrm{e}^{(\sigma+\mathrm{j}\omega_0)n} \tag{1-1-5}$$

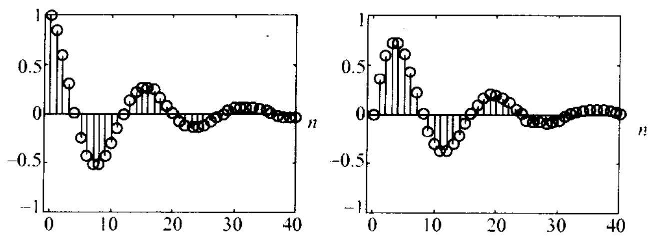
式中 ω_0 为数字频率，有关数字频率的概念将在后面章节中详细说明。将复指数表示成实部与虚部

$$x(n)=\mathrm{e}^{\sigma n}\cos\omega_0 n+\mathrm{j}\mathrm{e}^{\sigma n}\sin\omega_0 n$$

当 $\sigma=0$ 时

$$x(n)=\cos\omega_0 n+\mathrm{j}\sin\omega_0 n$$

实部与虚部分别为余弦与正弦序列。显然，复指数序列是频率 ω_0 的周期函数，周期为 2π。如图 1-1-10 所示为复指数序列的示意图。



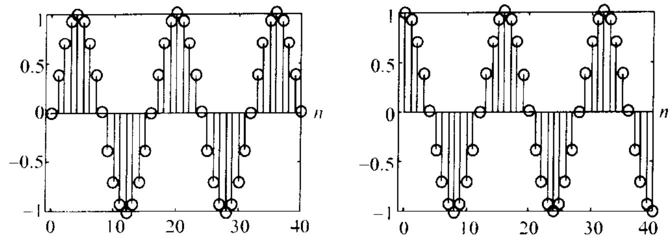
(a) 复指数序列的实部　　(b) 复指数序列的虚部

图 1-1-10　复指数序列的示意图

如图 1-1-11 所示为 $\sigma=0$ 时复指数序列的实部与虚部分别成为余弦与正弦序列的示意图。

1.1.4　序列的周期性

若序列 $x(n)$ 满足



(a) 正弦序列　　(b) 余弦序列

图 1-1-11　$\sigma = 0$ 时由复指数序列退化成的正弦与余弦序列

$$x(n) = x(n + N) \qquad -\infty < n < \infty \tag{1-1-6}$$

且 N 是使式(1-1-6)成立的最小正整数,则称 $x(n)$ 是以 N 为周期的周期序列。图 1-1-12 所示为周期序列的示意图。按照周期序列的定义,对正弦序列 $x(n) = \sin(\omega_0 n + \varphi)$,因为

$$x(n) = \sin(\omega_0 n + \varphi) = \sin(\omega_0 n + \varphi + 2k\pi) = \sin\left[\omega_0\left(n + \frac{2\pi k}{\omega_0}\right) + \varphi\right]$$

其中 k 为整数,除非 $p = 2\pi k/\omega_0$ 为整数,否则正弦序列没有周期。

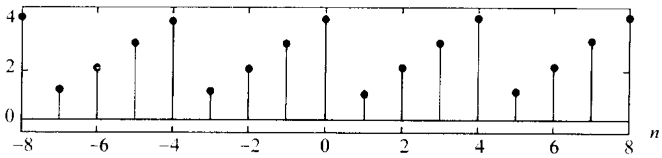


图 1-1-12　周期序列的示意图

例 1-1-2　求 $x(n) = \sin\left(\frac{4}{3}\pi n\right)$的周期 N。

解　因为 $\omega_0 = \frac{4}{3}\pi$, $x(n) = \sin\left(\frac{4}{3}\pi n + 2k\pi\right) = \sin\left[\frac{4}{3}\pi\left(n + \frac{6k}{4}\right)\right]$,所以 $p - 2\pi k/\omega_0 = 6k/4$,取 $k = 2$,得到 p 的最小正整数即 $x(n)$ 的周期为 $N = 3$。

为了明确起见,对周期为 N 的周期序列 $x(n)$ 常记为 $\tilde{x}(n)$,并可将其表示成和式的形式

$$\tilde{x}(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(n + mN)$$

其中 $x(n)$ 代表 $m = 0$ 时的取值,或第一个周期。

1.1.5　用单位脉冲序列表示任意序列

任意序列 $x(n)$ 都可用单位脉冲序列 $\delta(n)$ 表示成加权和的形式,即

$$x(n) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} x(m)\delta(n - m) \tag{1-1-7}$$

上述表达式在离散系统分析中是一个十分有用的公式。例如